

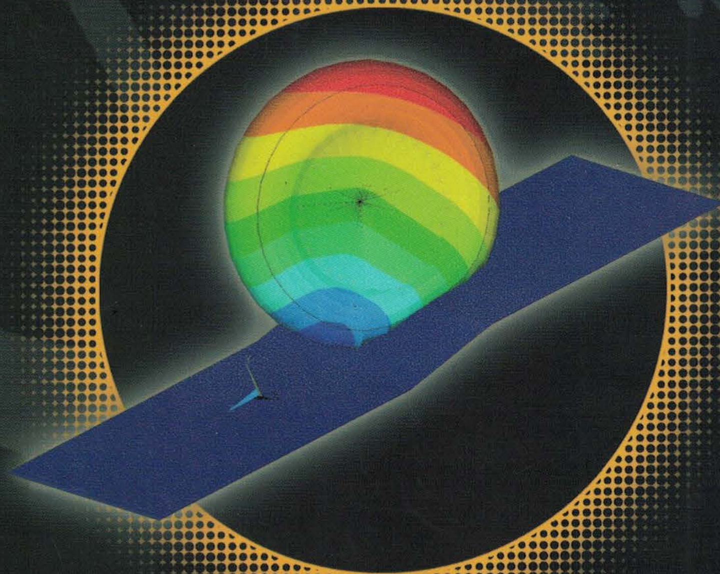
CAD/CAM/CAE工程应用丛书 ANSYS系列

ANSYS 14.0/FLOTRAN 理论解析与工程应用实例

◎张洪才 孙长青 等编著

本书核心内容包含

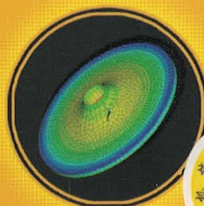
- FLOTRAN流–固耦合分析
- 温差驱动流体流动分析
- 弯管的瞬态流场分析
- 钝体绕流瞬态分析
- 开闸后水流流动的VOF分析
- 喷管三维流场分析
- 联合使用ALE和VOF模拟动壁
- 汽车的空气动力学分析
- 三种混合体传输流动分析
- 稳态流–固双向耦合分析





附赠超值 DVD 光盘

范例素材+视频讲解









机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

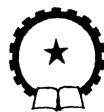
VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书 · ANSYS 系列

ANSYS 14.0/FLOTRAN 理论解析与工程应用实例

张洪才　孙长青　等编著



机 械 工 业 出 版 社

本书以 ANSYS 14.0 版本为基础，对 ANSYS 流体分析模块 FLOTRAN 的基本理论、基本思路、操作步骤和应用技巧进行了详细介绍，并结合典型工程应用实例详细讲述了 FLOTRAN 的具体工程应用方法。

本书注重流体力学理论与 FLOTRAN 的软件操作相结合，实例工程背景强，包括了现在研究热点问题：流-固耦合分析，流-热耦合分析和流-固-热耦合分析，能够快速提高读者的工程实例分析能力。本书切实从读者学习和使用的实际出发来安排章节顺序和内容，图文并茂；讲述过程中，结合了大量分析实例，力求易于理解并方便学习和实践过程中的使用。本书配套光盘提供了实例的视频教程和实例文件。

本书不仅适合作为高等学校理工类高年级本科生或研究生学习计算流体动力学模块 FLOTRAN 的教材，还可供从事结构分析的工程技术人员参考使用，同时书中提供的大量实例也可供高级用户参考。

图书在版编目（CIP）数据

ANSYS 14.0/FLOTRAN 理论解析与工程应用实例 / 张洪才编著．—北京：机械工业出版社，2013.7

（CAD/CAM/CAE 工程应用丛书 • ANSYS 系列）

ISBN 978-7-111-43383-5

Ⅰ．①A… Ⅱ．①张… Ⅲ．①有限元分析－应用软件 Ⅳ．①O241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 163942 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：张淑谦

责任编辑：张淑谦

责任印制：李 洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2013 年 8 月第 1 版 • 第 1 次印刷

184mm×260mm • 21.5 印张 • 530 千字

0001－4000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-43383-5

ISBN 978-7-89405-012-0（光盘）

定价：65.00 元（含 1DVD）

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
社服务中心：（010）88361066	教材网：http://www.cmpedu.com
销售一部：（010）68326294	机工官网：http://www.cmpbook.com
销售二部：（010）88379649	机工官博：http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：（010）88379203	封面无防伪标均为盗版

出 版 说 明

随着信息技术在各领域的迅速渗透，CAD/CAM/CAE 技术已经得到了广泛的应用，从根本上改变了传统的设计、生产、组织模式，对推动现有企业的技术改造、带动整个产业结构的变革、发展新兴技术、促进经济增长都具有十分重要的意义。

CAD 在机械制造行业的应用最早，使用也最为广泛。目前，其最主要的应用涉及机械、电子、建筑等工程领域。世界各大航空、航天及汽车等制造业巨头不但广泛采用 CAD/CAM/CAE 技术进行产品设计，而且投入大量的人力、物力及资金进行 CAD/CAM/CAE 软件的开发，以保持自己技术上的领先地位和国际市场上的优势。CAD 在工程中的应用，不但可以提高设计质量，缩短工程周期，还可以节约大量建设投资。

各行各业的工程技术人员也逐步认识到 CAD/CAM/CAE 技术在现代工程中的重要性，掌握其中一种或几种软件的使用方法和技巧，已成为他们在竞争日益激烈的市场经济形势下生存和发展的必备技能之一。然而，仅仅知道简单的软件操作方法是远远不够的，只有将计算机技术和工程实际结合起来，才能真正达到通过现代的技术手段提高工程效益的目的。

基于这一考虑，机械工业出版社特别推出了这套主要面向相关行业工程技术人员的“CAD/CAM/CAE 工程应用丛书”。本丛书涉及 AutoCAD、Pro/ENGINEER、Creo、UG、SolidWorks、Mastercam、ANSYS 等软件在机械设计、性能分析、制造技术方面的应用，以及 AutoCAD 和天正建筑 CAD 软件在建筑和室内配景图、建筑施工图、室内装潢图、水暖、空调布线图、电路布线图以及建筑总图等方面的应用。

本套丛书立足于基本概念和操作，配以大量具有代表性的实例，并融入了作者丰富的实践经验，使得本丛书内容具有专业性强、操作性强、指导性强的特点，是一套真正具有实用价值的书籍。

机械工业出版社

前　言

ANSYS 是目前国内外使用最为广泛的计算机辅助分析软件之一，经过 40 多年的发展，其强大的求解功能和良好的用户界面深受广大用户的欢迎。ANSYS 中的 FLOTRAN 模块是基于有限元方法来求解流体力学问题的有力工具。

本书以工程实例为载体，向读者详细讲解了 FLOTRAN 的湍流、热分析、可压缩流体、多组分传输、VOF、动网格、瞬态流体动力学、流−固耦合分析和流−固−热耦合分析的步骤和方法。本书内容全面新颖，理论与实践操作有机结合，并能做到以理论指导软件操作，让用户不但知道如何操作，而且知道为什么这样操作。本书实例工程背景强，讲述循序渐进，应用领域广泛。通过学习，读者可逐步提高自身的 FLOTRAN 操作水平及利用有限元分析理论进行流体动力学分析的能力，最终具备在流体分析领域解决实际工程问题的能力。

本书基本涵盖了 FLOTRAN 应用的所有分析类型，使读者阅读完本书就能够使用 FLOTRAN 进行产品分析。本书在编写时采用了 ANSYS 14.0/ FLOTRAN 版本，所涉及的知识也都是基于此版本进行介绍的，在讲解分析过程中，结合了图形用户界面（GUI）操作和命令行操作两种模式，读者可以根据自己的需要进行选择。

全书共 24 章，13 个工程实例，覆盖了大部分工程问题，也详细地讲解了一些热门问题，如流−固耦合分析、流−热耦合分析、流−固−热耦合分析，并配有相应的讲解视频教程，可以帮助读者在短时间内掌握这些复杂问题的分析流程和技巧；同时，还能够使读者领会到实际工程问题的分析思路，并能解决相关领域的问题。

本书面向初、中级用户，适合初、中级用户入门与提高阶段使用。全书主要由长春装甲兵技术学院张洪才编写，其中 19～24 章由沈阳工程学院孙长青编写，此外参加本书编写的还有长春装甲兵技术学院的刘宪伟、王海鹏、程华、钱永产、尹奇、金顶云、黄健，白城兵器试验中心的蒋陆德。编者长期从事 CAE 的研究工作，并根据自己的研究工作整理完成本书内容。同时，向所有参与和关心本书出版的领导、老师、亲人和朋友致以诚挚的谢意！由于水平有限，难免在写作方式和内容上存在疏漏之处，恳请读者批评指正。如有问题可发邮件到 zafansys@163.com。

编　者



目　录

出版说明
前言
第 1 章　FLOTRAN CFD 简介 ··· 1
1.1　CFD 分析的概念 ··· 1
1.2　FLOTRAN 的分析类型 ··· 1
1.3　FLOTRAN 的分析范例 ··· 2
1.3.1　问题的描述 ··· 2
1.3.2　命令流 ··· 3
第 2 章　FLOTRAN 理论基础 ··· 5
2.1　连续性方程 ··· 5
2.2　动量方程 ··· 5
2.3　可压缩流体能量方程 ··· 6
2.4　不可压缩能量方程 ··· 7
2.5　湍流 ··· 7
2.5.1　雷诺数 ··· 9
2.5.2　湍流模型 ··· 9
2.5.3　零能方程 ··· 10
2.5.4　标准 k-ε湍流模型 ··· 11
2.5.5　RNG 湍流模型 ··· 13
2.5.6　NKE 湍流模型 ··· 14
2.5.7　GIR 湍流模型 ··· 16
2.5.8　SZL 湍流模型 ··· 17
2.5.9　标准 k-ω湍流模型 ··· 18
2.5.10　SST 湍流模型 ··· 19
2.5.11　近壁区域处理 ··· 21
2.6　压力 ··· 22
第 3 章　有限元求解流体力学原理 ··· 24
3.1　离散方程 ··· 24
3.2　瞬态项 ··· 25
3.3　对流项 ··· 26
3.3.1　单调流线迎风法（MSU） ··· 26
3.3.2　流线迎风/Petro-Galerkin 方法（SUPG） ··· 27
3.3.3　修正 Galerkin 方法（COLG） ··· 28
3.4　扩散项 ··· 29
3.5　源项 ··· 29
3.6　分离解求解算法 ··· 29
第 4 章　FLOTRAN 求解器 ··· 35
4.1　TDMA 求解器 ··· 35
4.2　共轭残差求解器 ··· 36
4.3　预条件共轭残差求解器 ··· 37
4.4　共轭梯度求解器 ··· 37
4.5　预条件广义极小残差求解器 ··· 37
4.6　稀疏矩阵直接求解法 ··· 39
4.7　预条件 BiCGStab 求解器 ··· 39
第 5 章　FLOTRAN 收敛技术 ··· 41
5.1　收敛 ··· 41
5.2　稳定性 ··· 41
5.2.1　松弛 ··· 42
5.2.2　惯性松弛 ··· 43
5.2.3　人工粘度 ··· 44
5.3　残差文件 ··· 44
5.4　修正惯性松弛 ··· 45
5.5　自由度限值 ··· 46
第 6 章　流体属性及环境参数 ··· 48
6.1　密度 ··· 48
6.1.1　理论简介 ··· 48
6.1.2　选择方法 ··· 49
6.2　粘度 ··· 51
6.2.1　牛顿流体粘度理论 ··· 51
6.2.2　非牛顿流体粘度理论 ··· 52
6.2.3　选择方法 ··· 53
6.3　导热系数 ··· 55
6.3.1　理论简介 ··· 55
6.3.2　选择方法 ··· 56
6.4　比热容 ··· 58
6.4.1　理论简介 ··· 58
6.4.2　选择方法 ··· 58

6.5 表面张力系数 59
6.5.1 理论简介 59
6.5.2 选择方法 59
6.6 壁面静态接触角 59
6.6.1 理论简介 59
6.6.2 选择方法 60
6.7 设置流体计算环境 60
6.7.1 设置流体计算参考条件 60
6.7.2 设置流体计算的转动坐标系 61
6.7.3 设置流体计算重力 62
第 7 章 流体求解导出量 63
7.1 马赫数 63
7.2 总压力 63
7.3 y^+和壁面剪切应力 63
7.4 流线函数 64
7.4.1 笛卡儿坐标系几何体 64
7.4.2 轴对称几何体（对称轴：X） 64
7.4.3 轴对称几何体（对称轴：Y） 64
7.4.4 极坐标系 64
7.5 对流换热系数 65
7.5.1 计算节点热通量 65
7.5.2 计算热梯度 65
7.5.3 计算对流系数 65
7.6 设置流体导出量 65
第 8 章 FLOTRAN 单元 67
8.1 单元简介 67
8.2 输入数据 67
8.3 单元模型 68
8.3.1 分布式阻力 68
8.3.2 风扇模型 68
8.3.3 非流体单元 68
8.4 单元关键字 69
8.5 实常数 69
8.5.1 动网格和壁面粗糙度 70
8.5.2 风扇和分布阻力模型 70
8.5.3 同时使用所有选项 73
第 9 章 边界条件 74
9.1 进口/出口边界 74
9.1.1 设置流速 74
9.1.2 设置压力 76
9.1.3 设置温度 77
9.2 壁面边界条件 77
9.2.1 固定壁面条件 77
9.2.2 移动壁面 77
9.2.3 壁面粗糙度 78
9.3 对称边界条件 78
9.4 周期边界条件 79
9.5 相交边界条件 79
9.6 湍流边界条件 79
第 10 章 FLOTRAN 求解功能 81
10.1 FLOTRAN 的基本分析步骤 81
10.1.1 确定问题的区域 81
10.1.2 划分网格 81
10.1.3 施加边界条件 81
10.1.4 设置流体状态 81
10.1.5 设置 FLOTRAN 计算参数 82
10.1.6 求解 82
10.1.7 检查结果 83
10.2 热分析 83
10.2.1 网格要求 83
10.2.2 指定流体属性参数 83
10.2.3 热载荷和边界条件 83
10.2.4 求解策略 84
10.3 瞬态分析 88
10.3.1 时间积分方法 88
10.3.2 设置时间步和收敛 89
10.3.3 终止计算和输出控制 90
10.3.4 施加瞬态分析边界条件 91
10.4 动网格（ALE） 92
10.4.1 边界条件 92
10.4.2 网格更新 93
10.4.3 重画网格 94
10.5 流体体积法（VOF） 94
10.5.1 VOF 基本理论 94
10.5.2 VFRC 载荷 95
10.5.3 输入设置 97
10.5.4 后处理 99
10.6 多组分传输分析 99

10.6.1　理论基础 99
10.6.2　多组分传输分析步骤 100
第 11 章　FLOTRAN 流−固耦合分析 105
11.1　单代码多场求解器 105
11.1.1　创建需要求解的场模型 105
11.1.2　创建不同场之间的界面条件 105
11.1.3　设置单代码多场求解器 106
11.1.4　求解和后处理 112
11.2　基于物理环境求解多场 113
11.2.1　创建模型 113
11.2.2　创建物理环境 114
11.2.3　执行载荷传递耦合物理场分析 114
第 12 章　温差驱动流体流动分析 116
12.1　问题的描述 116
12.1.1　几何模型 116
12.1.2　流体属性参数 116
12.1.3　选择单元 116
12.1.4　流体流动模型 116
12.1.5　边界条件及载荷 116
12.2　GUI 操作 117
12.2.1　前处理 117
12.2.2　求解 118
12.2.3　后处理 122
12.3　命令流 123
第 13 章　弯管的瞬态流场分析 125
13.1　问题的描述 125
13.1.1　几何模型 125
13.1.2　流体属性参数 125
13.1.3　选择单元 125
13.1.4　流体流动模型 125
13.1.5　边界条件及载荷 125
13.2　GUI 操作 126
13.2.1　前处理 126
13.2.2　求解 128
13.2.3　后处理 134
13.3　命令流 136
第 14 章　钝体绕流瞬态分析 140
14.1　问题的描述 140
14.1.1　几何模型 140
14.1.2　流体属性参数 140
14.1.3　选择单元 140
14.1.4　流体流动模型 140
14.1.5　边界条件及载荷 140
14.2　GUI 操作 141
14.2.1　前处理 141
14.2.2　求解 142
14.2.3　后处理 149
14.3　命令流 151
第 15 章　开闸后水流流动的 VOF 分析 154
15.1　问题的描述 154
15.1.1　几何模型 154
15.1.2　流体属性参数 154
15.1.3　选择单元 154
15.1.4　流体流动模型 154
15.1.5　边界条件及载荷 154
15.2　GUI 操作 155
15.2.1　前处理 155
15.2.2　求解 157
15.2.3　后处理 163
15.3　命令流 165
第 16 章　喷管三维流场分析 168
16.1　问题的描述 168
16.1.1　几何模型 168
16.1.2　流体属性参数 168
16.1.3　选择单元 168
16.1.4　流体流动模型 169
16.1.5　边界条件及载荷 169
16.2　GUI 操作 169
16.2.1　前处理 169
16.2.2　求解 172
16.2.3　后处理 175
16.3　命令流 176
第 17 章　飞机起飞过程机翼瞬态流场分析 179
17.1　问题的描述 179
17.1.1　几何模型 179



17.1.2 流体属性参数 179
17.1.3 选择单元 179
17.1.4 流体流动模型 179
17.1.5 边界条件及载荷 179
17.2 GUI 操作 180
17.2.1 前处理 180
17.2.2 求解 183
17.2.3 后处理 192
17.3 命令流 195
第 18 章 联合使用 ALE 和 VOF 模拟动壁 199
18.1 问题的描述 199
18.1.1 几何模型 199
18.1.2 流体属性参数 199
18.1.3 选择单元 199
18.1.4 流体流动模型 199
18.1.5 边界条件及载荷 199
18.2 GUI 操作 200
18.2.1 前处理 200
18.2.2 求解 202
18.2.3 后处理 210
18.3 命令流 212
第 19 章 汽车的空气动力学分析 217
19.1 问题的描述 217
19.1.1 几何模型 217
19.1.2 流体属性参数 217
19.1.3 选择单元 217
19.1.4 流体流动模型 217
19.1.5 边界条件及载荷 218
19.2 GUI 操作 218
19.2.1 求解 219
19.2.2 后处理 224
19.3 命令流 225
第 20 章 三种混合体传输流动分析 228
20.1 问题的描述 228
20.1.1 几何模型 228
20.1.2 流体属性参数 228
20.1.3 选择单元 229
20.1.4 流体流动模型 229
20.1.5 边界条件及载荷 229
20.2 GUI 操作 229
20.2.1 前处理 229
20.2.2 求解 234
20.2.3 后处理 240
20.3 命令流 241
第 21 章 稳态流−固双向耦合分析 245
21.1 问题的描述 245
21.1.1 几何模型 245
21.1.2 流体属性参数 245
21.1.3 选择单元 245
21.1.4 流体流动模型 245
21.1.5 边界条件及载荷 245
21.2 GUI 操作 246
21.2.1 前处理 246
21.2.2 求解基本设置 249
21.2.3 多场耦合求解设置 256
21.2.4 后处理 259
21.3 命令流 260
第 22 章 振动金属板与水的双向瞬态流−固耦合分析 264
22.1 问题的描述 264
22.1.1 几何模型 264
22.1.2 材料参数 264
22.1.3 选择单元 264
22.1.4 流体流动模型 264
22.1.5 边界条件及载荷 265
22.2 GUI 操作 265
22.2.1 前处理 265
22.2.2 求解基本设置 269
22.2.3 多场耦合求解设置 280
22.2.4 多场求解 283
22.2.5 后处理 284
22.3 命令流 288
第 23 章 三通管的流-固-热稳态双向耦合分析 292
23.1 问题的描述 292
23.1.1 几何模型 292

23.1.2 材料参数 292
23.1.3 选择单元 292
23.1.4 流体流动模型 293
23.1.5 边界条件及载荷 293
23.2 GUI 操作 293
23.2.1 前处理 293
23.2.2 求解基本设置 297
23.2.3 多场耦合求解设置 304
23.2.4 后处理 307
23.3 命令流 308
第 24 章 加温器的流-热瞬态耦合分析 312
24.1 问题的描述 312
24.1.1 几何模型 312
24.1.2 材料参数 312
24.1.3 选择单元 312
24.1.4 流体流动模型 313
24.1.5 边界条件及载荷 313
24.2 GUI 操作 313
24.2.1 前处理 313
24.2.2 求解基本设置 317
24.2.3 多场耦合求解设置 323
24.2.4 多场求解 327
24.2.5 后处理 327
24.3 命令流 330



第 1 章 FLOTRAN CFD 简介



1.1 CFD 分析的概念

CFD 为计算流体动力学的简称，ANSYS 14.0 提供了多种求解流体动力学问题的工具。根据数值求解方法可分为以下两大类：基于有限元方法求解流体问题和基于有限体积法求解流体问题。FLOTRAN 属于前者，CFX 和 Fluent 属于后者。本书全面讲解基于有限元方法求解流体问题的有力工具——FLOTRAN。

FLOTRAN 分析功能是一个用于分析二维及三维流体流场的先进工具，可分析如下问题：

- 作用于气动翼（叶）型上的升力和阻力。
- 超音速喷管中的流场。
- 弯管中流体的复杂的三维流动。

同时，FLOTRAN 还具有如下功能：

- 计算发动机排气系统中气体的压力及温度分布。
- 研究管路系统中热的层化及分离。
- 使用混合流研究来估计热冲击的可能性。
- 用自然对流分析来估计电子封装芯片的热性能。
- 对含有多种流体的（由固体隔开）热交换器进行研究。
- 支持流-固耦合分析。
- 支持流-固-热耦合分析。

1.2 FLOTRAN 的分析类型

用户可以使用 FLOTRAN 进行以下流体分析：

（1）层流分析

层流中的速度场都是平滑有序的，高粘性流体（如石油等）的低速流动通常属于层流。

（2）湍流分析

湍流分析用于处理那些由于流速足够高和粘性足够低而引起湍流波动的流体流动情况，ANSYS 中的二方程湍流模型可考虑在平均流动下的湍流速度波动的影响。如果湍流和层流的密度在流动过程中保持不变或者当流体压缩时只消耗很少的能量，则该流体就被认为是不可压缩的，不可压缩流体的温度方程将忽略流体动能的变化和粘性耗散生热。

（3）热分析

流体分析中通常还会求解流场中的温度分布情况。如果流体性质不随温度而变，就可不解温度方程。在共轭传热问题中，要在同时包含流体区域和非流体区域（即固体区域）的整个区域上求解温度方程。在自然对流传热问题中，流体由于温度分布的不均匀性而导致流体密度分布的不均匀性，从而引起流体的流动，与强迫对流问题不同的是，自然对流通常都没有外部的流动源。

（4）可压缩流分析

对于高速气流，由很强的压力梯度引起的流体密度的变化将显著地影响流场的性质，ANSYS 对于这种流动情况会使用不同的解算方法。

（5）非牛顿流分析

应力与应变率之间呈线性关系的这种理论并不足以解释很多流体的流动，对于这种非牛顿流体，ANSYS 程序提供了三种粘性模式和一个用户自定义子程序。

（6）多组分传输分析

这种分析通常是用于研究有毒流体物质的稀释或大气中污染气体的传播情况，同时，它也可用于研究有多种流体同时存在（但被固体相互隔开）的热交换分析。

（7）VOF 分析

VOF 分析用于处理流体中包含无约束气体-液体的表面。用户可以使用该功能处理二维平面和轴对称问题，例如流体漫过大坝分析与二维的波浪运动分析等。

（8）动网格分析

FLOTRAN 中采用 ALE 算法，即任意的拉格朗日-欧拉方程来实现流体中的动网格分析。流体流动问题往往涉及动接触面，这种界面可能是可动的内壁，也可能是可动的外壁或自由界面，对于这种问题可以使用 ALE 方法来求解。

（9）多场耦合分析

目前，在工程中存在很多与流体相关的多场耦合问题，如流-固耦合，流-固-热耦合和流-热耦合问题，为此 ANSYS 基于 FLOTRAN 和多场耦合求解器为用户提供了较为完备的解决方案。

此外，这些分析类型并不相互排斥，例如，一个层流分析可以是传热的或者是绝热的，一个湍流分析可以是可压缩的或者是不可压缩的，动网格分析中可以包括 VOF 分析和瞬态分析。

1.3 FLOTRAN 的分析范例

1.3.1 问题的描述

本节通过一个简单的流场分析范例来详细说明 FLOTRAN 分析的基本流程，图 1-1 所示为二维导管流场分析模型，图中给出了模型的几何尺寸，单位为 mm，模型左边为入口，入口的速度为 5m/s，右边为出口，出口的压力为 0，其他边为壁面，计算时使用无滑移壁面边界条件，流体参数选用 AIR-SI，计算时激活 RNG 湍流模型。

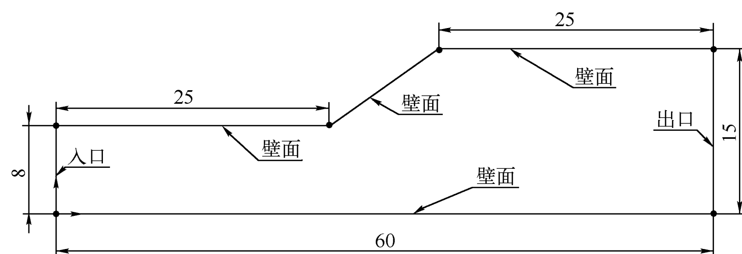


图 1-1 二维导管流场分析模型

1.3.2 命令流

```
!定义分析文件名
/FILNAME, Example of FLOTRAN analysis process.,0
/PREP7
ET,1,141 !定义流体单元
!建立模型
K,1,0,0,,
K,2,60E-3,0,
K,3,60E-3,15E-3
K,4,35E-3,15E-3
K,5,25E-3,8E-3
K,6,0,8E-3
A,1,2,3,4,5,6
!划分网格
ESIZE,1E-3
AMESH,ALL
/SOL
!定义流体边界条件
DL,1, ,VX,0,1
DL,1, ,VY,0,1
DL,1, ,VZ,0,1

DL,3, ,VX,0,1
DL,3, ,VY,0,1
DL,3, ,VZ,0,1

DL,4, ,VX,0,1
DL,4, ,VY,0,1
DL,4, ,VZ,0,1

DL,5, ,VX,0,1
DL,5, ,VY,0,1
DL,5, ,VZ,0,1

DL,6, ,VX,5,1
DL,6, ,VY,0,1
```

```
DL,6, ,VZ,0,1

DL,2, ,PRES,0,1
!开始 FLOTRAN 流体求解设置
!设置流体求解选项
FLDATA1,SOLU,FLOW,1
FLDATA1,SOLU,TURB,1
FLDATA1,SOLU,RDSF,1
!设置流体求解控制
FLDATA2,ITER,EXEC,15,

!设置流体计算结果的输出
FLDATA5,OUTP,PTOT,1
FLDATA5,OUTP,TTOT,1
FLDATA5,OUTP,HFLU,1
FLDATA5,OUTP,HFLM,1
FLDATA5,OUTP,STRM,1
FLDATA5,OUTP,PCOE,1
FLDATA5,OUTP,MACH,1
FLDATA5,OUTP,YPLU,1
FLDATA5,OUTP,TAUW,1
FLDATA5,OUTP,RDFL,1
!定义流体属性参数
FLDATA7,PROT,DENS,AIR-SI
FLDATA7,PROT,VISC,AIR-SI

!选择湍流模型
FLDATA24,TURB,MODL,3
FLDATA24,RNGT,CMU,0.085,
FLDATA24,RNGT,C1,1.42,
FLDATA24,RNGT,C2,1.68,
FLDATA24,RNGT,SCTK,0.72,
FLDATA24,RNGT,SCTD,0.72,
FLDATA24,RNGT,BETA,0.012,
FLDATA24,RNGT,ETAI,4.38,
! FLOTRAN 流体求解设置结束
!开始求解
SOLVE
```

从本范例可以归纳总结出，FLOTRAN 的一般分析流程如下：

1）定义分析文件名。

2）定义单元。

3）建立模型。

4）进行网格划分。

5）定义流体分析边界。

6）进行流体求解设置。

7）求解。

8）后处理。

第 2 章 FLOTRAN 理论基础



2.1 连续性方程

由流体的质量守恒定律可以导出流体的连续性方程，即

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z}=0 \tag{2-1}$$

式中，v_x、v_y 和 v_z 分别是 x，y 和 z 方向上的速度分量；ρ为密度；x、y、z 为总体笛卡儿坐标；t 为时间。

密度的变化率可以使用压力的变化率和密度对压力的变化率表示，即

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}=\frac{\partial \rho}{\partial p}\frac{\partial p}{\partial t} \tag{2-2}$$

式中，p 为压力。

由状态方程可以计算密度关于压力的导数。如果使用可压缩算法，则理想气体假设为

$$\rho=\frac{p}{RT}\rightarrow\frac{\partial \rho}{\partial p}=\frac{1}{RT} \tag{2-3}$$

式中，R 为气体常数；T 为温度。

如果使用不可压缩算法（默认），则用户可以控制密度关于压力的导数值：

$$\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}p}=\frac{1}{\beta} \tag{2-4}$$

式中，β为体积模量，β 的默认值为 1×10^{16}，表明为理想不可压缩流体，压力波将以无限大速度穿越整个流体求解区域。

2.2 动量方程

在牛顿流体中，应力和流体变形率存在以下关系

$$\tau_{ij}=-p\delta_{ij}+\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)+\delta_{ij}\lambda\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \tag{2-5}$$

式中，τ_{ij} 为应力张量；u_i 为正交速度（$u_1=v_x$，$u_2=v_y$，$u_3=v_z$）；μ为动力粘度（Pa·s）；λ为粘度第二系数。动力粘度将应力与流体线变形联系到一起，第二粘度系数将应力与流体体积变形联系到一起。流体抵抗流体质点（或流层）之间相对运动或者抵抗流体剪切变形的性质称为流体的粘度。式（2-5）的最后一项表示粘度第二系数与速度散度的乘积，对于密度为恒定的流体则该项等于 0，设置该项为一个非常小的值以便在可压缩流体求解中忽略该项。

使用式（2-5）可以把动量方程转换为 N-S 方程，本章将 N-S 方程也称为广义动量方程，该方程中不包括应力项。对于流体属性没有进行任何假设的动量方程（N-S 方程）如下：

$$\frac{\partial \rho v_x}{\partial t}+\frac{\partial(\rho v_x v_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v_y v_x)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho v_z v_x)}{\partial z}=\rho g_x-\frac{\partial P}{\partial x}+ R_x+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_e\frac{\partial v_x}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_e\frac{\partial v_x}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_e\frac{\partial v_x}{\partial z}\right)+T_x \tag{2-6}$$

$$\frac{\partial \rho v_y}{\partial t}+\frac{\partial(\rho v_x v_y)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v_y v_y)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho v_z v_y)}{\partial z}=\rho g_y-\frac{\partial P}{\partial y}+ R_y+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_e\frac{\partial v_y}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_e\frac{\partial v_y}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_e\frac{\partial v_y}{\partial z}\right)+T_y \tag{2-7}$$

$$\frac{\partial \rho v_z}{\partial t}+\frac{\partial(\rho v_x v_z)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v_y v_z)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho v_z v_z)}{\partial z}=\rho g_z-\frac{\partial P}{\partial z}+ R_z+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_e\frac{\partial v_z}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_e\frac{\partial v_z}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_e\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)+T_z \tag{2-8}$$

式中，g_x、g_y、g_z 为重力产生的加速度分量；ρ为流体密度；μ_e 为有效粘度；R_x、R_y、R_z 为分布式阻力；T_x、T_y、T_z 为粘性损失项。

对于层流情况，有效粘度就是动力粘度。对于湍流的有效粘度在下面将进行讨论和说明。R_x、R_y、R_z 表示用户希望添加的任何流体源项（source terms）。其中一个例子就是使用 R_x、R_y、R_z 引入分布式阻力，该阻力可以模拟计算一些几何特征对流体场的影响而不需要对该几何特征进行实体建模。这些例子还包括流体流过栅格和多孔介质问题。

对于不可压缩流体和流体属性参数为恒定值时，不考虑粘性损失项 T_x、T_y、T_z。T_x、T_y、T_z 的表达式如下

$$T_x=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial v_x}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial v_y}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial v_z}{\partial x}\right) \tag{2-9}$$

$$T_y=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial v_x}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial v_y}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial v_z}{\partial y}\right) \tag{2-10}$$

$$T_z=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial v_x}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial v_y}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial v_z}{\partial z}\right) \tag{2-11}$$

以停滞（总）温度项来表示能量守恒。这种方法非常适合于高度可压缩流体、静态温度流体和低速可压缩流体分析。

2.3　可压缩流体能量方程

在考虑热传导的可压缩流体问题时，需要求解完整的能量方程（使用 FLDATA1 命令）。基于总温度（停滞温度）的能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho C_p T_0\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho v_x C_p T_0\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\rho v_y C_p T_0\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\rho v_z C_p T_0\right)=$$
$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K\frac{\partial T_0}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K\frac{\partial T_0}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K\frac{\partial T_0}{\partial z}\right)+W_{\mathrm{v}}+E_{\mathrm{k}}+Q_v+\Phi+\frac{\partial P}{\partial t} \tag{2-12}$$

式中，C_{p} 为比热容；T_0 为总温度（停滞温度）；K 为导热系数；W_{v} 为粘性功；Q_{v} 为体积热源；Φ 为粘性耗散；E_{k} 为动能。

可以从总温中计算静态温度，即

$$T=T_0-\frac{v^2}{2C_{\mathrm{p}}} \tag{2-13}$$

式中，T 为静态温度（以 TEMP 输出）；v 为流体的速度矢量的大小。

对于非牛顿流体，静态和总温度的表达式及关系也是一样的。

使用张量方法表示粘性功的表达式如下

$$W^v=u_j u\left(\frac{\partial}{\partial x_i}\frac{\partial u_j}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_k}\frac{\partial u_k}{\partial x_j}\right) \tag{2-14}$$

其中，重复的一个下角标表示在三个正交方向求和。

动能的表达式为

$$E_{\mathrm{k}}=-\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{K}{C_{\mathrm{p}}}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{2}\left|v^2\right|\right)\right]-\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{K}{C_{\mathrm{p}}}\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{2}\left|v^2\right|\right)\right]-\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{K}{C_{\mathrm{p}}}\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{2}\left|v^2\right|\right)\right] \tag{2-15}$$

最后，使用张量表示粘性耗散的表达式如下

$$\Phi=\mu\left(\frac{\partial\mu_i}{\partial x_k}+\frac{\partial\mu_k}{\partial x_i}\right)\frac{\partial\mu_i}{\partial x_k} \tag{2-16}$$

对于热传导情况，方程（2-13）被用来从指定的总温度中计算静态温度。

2.4　不可压缩能量方程

忽略可压缩能量方程中的粘性功、压力功、粘性耗散和动能，则可得到不可压缩能量方程。因为忽略了动能，所以静态温度和总温度是相等的。能量方程的静态温度的热传导方程的形式为

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho C_{\mathrm{p}}T\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho v_x C_{\mathrm{p}}T\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\rho v_y C_{\mathrm{p}}T\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\rho v_z C_{\mathrm{p}}T\right)$$
$$=\frac{\partial}{\partial x}\left(K\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K\frac{\partial T}{\partial z}\right)+Q_{\mathrm{v}} \tag{2-17}$$

2.5　湍流

对于流体，当惯性效应大于粘性效应时，则流体的状态可能就为湍流。用户负责确定流体的状态是层流还是湍流。湍流流动模型很多，但大致可以归纳为以下三类：第一类是湍流输运系数模型；第二类是抛弃了湍流输运系数的概念，直接建立湍流应力和其他二阶关联量

的输运方程；第三类是大涡模拟。前两类是以湍流的统计结构为基础，对所有涡旋进行统计平均。大涡模拟把湍流分成大尺度湍流和小尺度湍流，通过求解三维经过修正的 Navier-Stokes 方程，得到大涡旋的运动特性，而对小涡旋运动还采用上述的模型。实际求解中，选用什么模型要根据具体问题的特点来决定。选择的一般原则是精度要高、应用简单、节省计算时间，同时也具有通用性。

FLOTRAN 采用了湍流输运系数模型。当流体的状态为湍流时，则流体中的每一个点都是波动变化的。因此，湍流速度的表达式由常时均值速度和波动速度组成，即

$$v_x = \overline{v}_x + v_x' \tag{2-18}$$

式中，$\overline{v}_x$ 为 x 方向的常时均值速度；v_x' 为 x 方向的波动速度。

将湍流速度代入到 N-S 方程中，该方程将被时间进行平均。湍流速度中波动速度的平均值为 0，湍流速度的平均值为平均速度。在计算速度的平均值时，积分时间间隔是任意选择的，但要保证真实时间的瞬态效应不影响积分中的时间。下式给出了波动速度平均值和湍流瞬时速度的平均值表达式：

$$\begin{cases} \dfrac{1}{\delta_{\mathrm{t}}}\displaystyle\int_0^{\delta_{\mathrm{t}}} v_x' \mathrm{d}t = 0 \\ \dfrac{1}{\delta_{\mathrm{t}}}\displaystyle\int_0^{\delta_{\mathrm{t}}} v_x \mathrm{d}t = \overline{v}_x \end{cases} \tag{2-19}$$

式中，δ_{t} 为波动周期。将（2-19）代入到动量方程中，使用时间进行平均，则会导致出现附加项。动力方程中的速度是平均值，所以在随后的表达式中使用平均速度进行表示。附加项如下

$$\sigma_x^{\mathrm{R}} = -\frac{\partial}{\partial x}\left(\overline{\rho v_x' v_x'}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(\overline{\rho v_x' v_y'}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\overline{\rho v_x' v_z'}\right) \tag{2-20}$$

$$\sigma_y^{\mathrm{R}} = -\frac{\partial}{\partial x}\left(\overline{\rho v_y' v_x'}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(\overline{\rho v_y' v_y'}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\overline{\rho v_y' v_z'}\right) \tag{2-21}$$

$$\sigma_z^{\mathrm{R}} = -\frac{\partial}{\partial x}\left(\overline{\rho v_z' v_x'}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(\overline{\rho v_z' v_y'}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\overline{\rho v_z' v_z'}\right) \tag{2-22}$$

式中，σ^{R} 为雷诺应力。

湍流输运系数模型假设速度脉动的二阶关联量表示成平均速度梯度与湍流粘性系数的乘积。即

$$-\overline{\rho v_x v_y} = \mu_{\mathrm{t}} \frac{\partial v_x}{\partial y} \tag{2-23}$$

有效粘度是层流粘度（层流粘度是流体的属性）和湍流粘度（湍流粘度从湍流模型中计算所得）之和。即

$$\mu_{\mathrm{e}} = \mu + \mu_{\mathrm{t}} \tag{2-24}$$

如果密度是变化的流动过程，如燃烧问题，我们可以用法夫雷（Favre）平均。这样才可以求解存在密度变化的流动问题。法夫雷平均就是除了压力和密度本身以外，所有变量都用密度加权平均。变量的密度加权平均定义为

$$\tilde{\phi} = \frac{\overline{\rho\phi}}{\overline{\rho}} \tag{2-25}$$

波浪线表示的 Favre 平均变量。

2.5.1 雷诺数

无量纲参数雷诺数通过计算流体微团的惯性力与粘性力的比值，来帮助用户判断流体的状态是湍流还是层流。该参数是表征粘性影响的相似参数，其表达式为

$$R_e = \frac{\rho v L_c}{\mu} \tag{2-26}$$

式中，ρ和μ分别是流体中的密度（Kg/m^3）和绝对粘度[Kg/(m/s)]；v 为流体的流场速度；L_c 为流体的流场特征长度。

对于内流问题流场的特征长度为水力直径，即

$$L_c = D_h = 4\frac{\text{横截面流动面积}}{\text{湿周长}} \tag{2-27}$$

例如，管子的水力直径就是它的直径，对于管道内的流动问题，当雷诺数超过 2300 时，就应该激活湍流模型。

对于外流问题，流体的流场特征长度一般取物体的主要尺寸，如机翼弦长或圆球直径。对于平板绕流问题，流场的特征长度是从平板前缘沿平板的长度，当雷诺数大约超过 500000 时，层流转换为湍流。

2.5.2 湍流模型

FLOTRAN 提供了 8 种湍流模型：

- 标准的 k-ε 模型。
- 零能方程模型（Zero Equation Model）。
- RNG k-ε 模型（Re-normalized Group Model）。
- NKE k-ε 模型（New k-ε Model due to Shih）。
- GIR k-ε 模型（Model due to Girimaji）。
- SZL k-ε 模型（Shi, Zhu, Lumley Model）。
- 标准的 k-ω模型。
- SST 模型（Shear Stress Transport Model）。

这 8 种湍流模型中最简单模型为零能方程湍流模型。RNG、NKE、GIR 和 SZL 模型是对标准 k-ε 模型的修正模型。通常，在大应变区 RNG、NKE、GIR 和 SZL 湍流模型能够得到更加真实和可靠的结果。因此这些模型适用于流动被急剧加速或减速的情况，如收敛喷管和流动存在严重的分离或回流，或一个流动经历了 180° 转弯的管道。

RNG、NKE、GIR 和 SZL 湍流模型通过调整湍流常数 C_μ 和耗散方程中的源项实现控制额外的湍流，调整与局部的应变率保持一致。

k-ε湍流模型及其修正模型，将湍流粘度作为湍流参数中的动能 k 和耗散率ε的函数进行计算，表达式如下

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{2-28}$$

式中，C_μ 为湍流常数；k 为湍流动能（以 ENKE 输入和输出）；ε为湍流动能耗散率（以 ENDS 输入和输出）。

在 RNG 和标准 k-ε 湍流模型中，C_μ 为常数，在 NKE、GIR 和 SZL 湍流模型中为变量。

在 k-ω模型和 SST 模型中，湍流粘度的计算公式为

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \tag{2-29}$$

ω的表达式为

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_\mu k} \tag{2-30}$$

式中，ω 为比值耗散率（specific dissipation rate）。

k-ε 模型及其修正模型需要求解湍流动能和湍流动能耗散率的偏微分方程，而 k-ω和 SST 湍流模型需要求解湍流动能和耗散率的偏微分方程。

一般来说，标准 k-ε 模型是第一个可以使用的模型。该模型可以真实地模拟流动情况。特别适用于管道和槽道中的湍流流动分析。然而，在很多情况下，它对湍流强度总是预测过高。例如，在收敛喷管中的流动经历重要的法向应变，标准 k-ε 模型总是过高估计湍流强度。导致湍流动能被过高估计，并且有些情况还会导致有效粘度阻止湍流中的激波模拟。

k-ω 湍流模型在近壁面处存在优势，它可以精确地预测逆压力梯度下的湍流长度尺度。对于自由流湍流 k-ω 模型比 k-ε 模型更加敏感。剪应力传送模型（SST）合并了近壁处的 k-ω 模型和远离壁面处的标准 k-ω 模型来克服两种湍流模型的不足。

2.5.3 零能方程

1．理论简介

零能方程使用下式计算湍流粘度

$$\mu_t = \rho L_s^2 \sqrt{\Phi} \tag{2-31}$$

式中，μ_t 为湍流粘度；Φ为粘性耗散；$L_s = \begin{cases} L_x & L_x > 0 \\ \min(0.4L_n, 0.09L_c) & L_x \leqslant 0 \end{cases}$，$L_x$ 为长度尺度，L_n 为节点到最近壁面的最短长度，L_c 为流体中的特征尺度。

零能方程湍流模型是最简单和最快速的模型。用于具有相当简单的几何和流动特性问题，如果存在严重分离或回流，该模型将不会给出精确的结果。

2．激活方法

可以使用以下方式激活零能方程湍流模型：

命令：FLDATA24,TURB

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Setup | Turbulence | Turbulence Model，弹出图 2-1 所示的湍流模型设置面板。选择 Zero equation 项，单击 OK 按钮，激活零能方程，

弹出图 2-2 所示的零能方程输入参数面板，由式（2-31）式可知，只需输入长度尺度（Lengh）L_x 即可。

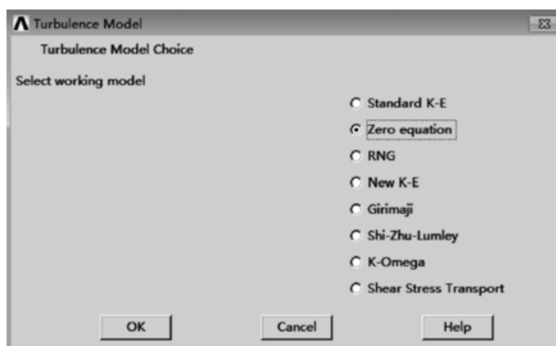


图 2-1 湍流模型设置面板

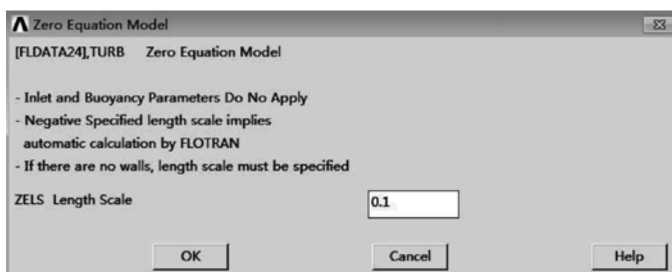


图 2-2 零能方程输入参数面板

零能方程湍流模型可以自动计算长度尺度或可以指定长度尺度。通常，当使用零能方程湍流模型时，湍流比可以设置为 2。

2.5.4 标准 k-ε 湍流模型

1．理论简介

标准的 k-ε 湍流模型的湍流动能方程为

$$\begin{aligned}&\frac{\partial \rho k}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho v_x k\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\rho v_y k\right)}{\partial y}+\frac{\partial\left(\rho v_z k\right)}{\partial z}=\\&\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\mu_{\mathrm{t}}}{\sigma_{\mathrm{k}}}\frac{\partial k}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\mu_{\mathrm{t}}}{\sigma_{\mathrm{k}}}\frac{\partial k}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\mu_{\mathrm{t}}}{\sigma_{\mathrm{k}}}\frac{\partial k}{\partial z}\right)+\\&\mu_{\mathrm{t}}\Phi-\rho\varepsilon+\frac{C_4\beta\mu_{\mathrm{t}}}{\sigma_{\mathrm{t}}}\left(g_x\frac{\partial T}{\partial x}+g_y\frac{\partial T}{\partial y}+g_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)\end{aligned} \tag{2-32}$$

标准的 k-ε 湍流模型的耗散率方程为

$$\begin{aligned}&\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho v_x \varepsilon\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\rho v_y \varepsilon\right)}{\partial y}+\frac{\partial\left(\rho v_z \varepsilon\right)}{\partial z}=\\&\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\mu_{\mathrm{t}}}{\sigma_{\varepsilon}}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\mu_{\mathrm{t}}}{\sigma_{\varepsilon}}\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\mu_{\mathrm{t}}}{\sigma_{\varepsilon}}\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right)+\\&C_{1\varepsilon}\mu_{\mathrm{t}}\frac{\varepsilon}{k}\Phi-C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+\frac{C_{\mu}\left(1-C_3\right)\beta\rho k}{\sigma_{\mathrm{t}}}\left(g_x\frac{\partial T}{\partial x}+g_y\frac{\partial T}{\partial y}+g_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)\end{aligned} \tag{2-33}$$

式（2-32）和式（2-33）中的最后一项用于模拟浮力影响。求解式（2-32）和式（2-33），需要提供以下参数：σ_k——湍流动能方程中的施密特数；C_4——湍流动能方程常数；β——热膨胀系数=$\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial T}$，该参数表示在压强保持恒定的情况下，流体的体积随温度升高而增加（体积膨胀）的特性成为流体的膨胀性；σ_t——能量方程中的施密特数；σ_ε——湍流动能耗散率方程中的施密特数；$C_{1\varepsilon}$——湍流动能耗散率常数；C_2——湍流动能耗散率常数；C_μ——湍流常数。此外，求解式（2-32）和式（2-33），用户还需要提供流体属性参数：μ_t——湍流粘度；ρ——流体密度。如果求解过程中考虑流体温度，则还需联合使用能量方程进行求解。用户还需要输入另外两个参数：导热系数和比热容。具体的定义方法用户可参见第 6 章。表 2-1 列出了这些参数的程序默认值。

表 2-1　标准 k-ε 湍流模型计算参数

$C_{1\varepsilon}$	C_2	C_μ	σ_k	σ_ε	σ_t	C_3	C_4	β
1.44	1.92	0.09	1.0	1.3	0.85	1.0	0.0	0.0

通过计算湍流方程可以获得有效粘度和有效热导热系数，即

$$\mu_e = \mu + C_\infty \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{2-34}$$

$$K_e = K + \frac{\mu_t C_p}{\sigma_t} \tag{2-35}$$

式中，μ_e 为有效粘度；K_e 为有效导热系数；σ_t 为湍流施密特数（Schmidt）。

其他 4 个湍流模型，通过构造新的 C_μ或耗散方程中的源流体项来实现对 k-ε 湍流模型的修正。修改后的新函数使用两个不变量进行构造，其中一个不变量为对称变形张量 S_{ij}，另一个不变量为非对称转动张量 W_{ij}。这两个不变量都是基于流体流场速度建立的：

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(v_{i,j} + v_{j,i}\right) \tag{2-36}$$

$$W_{i,j} = \frac{1}{2}\left(v_{i,j} - v_{j,i}\right) + C_r \Omega_m \varepsilon_{mij} \tag{2-37}$$

式中，C_r 为与使用的湍流模型相关的常数；Ω_m 为坐标系的角速度；ε_{mij} 为交变张量算子。

该不变量为

$$\eta = \frac{k}{\varepsilon}\sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \tag{2-38}$$

和

$$\zeta = \frac{k}{\varepsilon}\sqrt{2W_{ij}W_{ij}} \tag{2-39}$$

2．激活方法

可以使用以下方式激活标准 k-ε 湍流模型

命令：FLDATA24,TURB

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Setup | Turbulence | Turbulence Model，弹出图 2-1 所示的湍流模型设置面板。选择 Standard K-E 项，单击 OK 按钮，激活标准 k-ε 湍

流模型，弹出图 2-3 所示的标准 k-ε 湍流模型输入参数面板，输入 4 个参数 Cmu、C1、C2 和 SCTK。这 4 项参数的含义：Cmu 为式（2-33）中的湍流常数 C_μ，C1 为式（2-33）中的 $C_{1\varepsilon}$，C2 为式（2-33）中 C_2，STCK 为式（2-32）中的湍流动能施密特数σ_k，这 4 个参数的默认值如图 2-3 所示。

用户可通过下列方式设置浮力计算参数：

命令：FLDATA24,TURB

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Turbulence | Buoyancy Terms，弹出图 2-4 所示的湍流浮力影响输入参数面板，输入 3 个参数 BUC3、BUC4 和 BETA，这 3 项参数的含义：BUC3 为式（2-33）中的湍流常数 C_3，BUC4 为式（2-32）中的 C_4，BETA 为式（2-33）中的β。

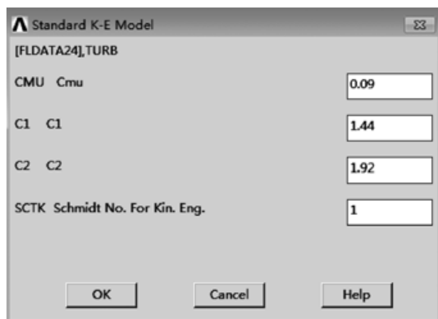


图 2-3 标准 k-ε 湍流模型输入参数面板

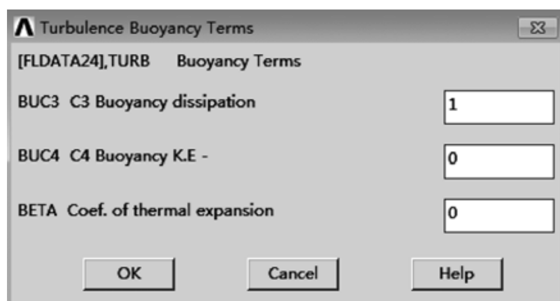


图 2-4 湍流浮力影响输入参数面板

由表 2-1 可知，标准的 k-ε 湍流模型中有 9 个控制参数，其中 8 个参数支持 GUI 方式修改，此外还有一个湍流动力耗散方程中的施密特数σ_ε只能使用命令进行修改，格式如下：FLDATA24,TURB,SCTD,Value，其中的 Value 则用户输入的σ_ε。

2.5.5 RNG 湍流模型

1. 理论简介

RNG k-ε 模型可以计算低雷诺数湍流，其考虑到旋转效应，对强旋流计算精度有所提高。RNG k-ε 模型来源于严格的统计技术。它和标准 k-ε 模型很相似，但是有以下改进：

1）RNG 模型在ε方程中加了一个条件，有效地改善了精度。

2）考虑到了湍流漩涡，提高了在这方面的精度。

3）RNG 理论为湍流 Prandtl 数提供了一个解析公式，然而标准 k-ε模型使用的是用户提供的常数。

4）标准 k-ε 模型是一种高雷诺数的模型，RNG 理论提供了一个考虑低雷诺数流动粘性的解析公式。这些公式的作用取决于正确地处理近壁区域。

这些特点使得 RNG k-ε 模型比标准 k-ε 模型在更广泛的流动中有更高的可信度和精度。RNG k-ε 湍流模型非常适合模拟具有大曲率的几何模型，如一个经历 180° 转弯的管道。

在 RNG 模型中，使用一个不变量的函数计算湍流动能耗散式（2-33）中的 $C_{1\varepsilon}$，即

$$C_{1\varepsilon} = C_1 - \frac{\eta\left(1-\dfrac{\eta}{\eta_\infty}\right)}{1+\beta^\infty\eta^3} \tag{2-40}$$

由式（2-40）可知，RNG k-ε 湍流模型求解需要 11 个控制参数，但其中 4 个参数与标准 k-ε 湍流模型参数默认值相同。因此，RNG k-ε 湍流模型可以输入 7 个控制参数：β^{∞}——RNG 湍流模型的常数、C_1——RNG 湍流模型常数、C_2——湍流动能耗散率常数、C_{μ}——湍流常数、σ_k——湍流动能方程中的施密特数、σ_{ε}——湍流动能耗散率的施密特数、η^{∞}——应变率参数η的渐进值。表 2-2 列出了 RNG k-ε湍流模型控制参数的默认值。对于 RNG 湍流模型，式（2-37）中的转动常数 C_r=0。

表 2-2　RNG *k-ε* 湍流模型计算参数

β^{∞}	C_1	C_2	C_{μ}	σ_k	σ_{ε}	η^{∞}
0.012	1.42	1.68	0.085	0.72	0.72	4.38

2．激活方法

可以使用以下方式选项激活 RNG k-ε 湍流模型：

命令：FLDATA24,TURB

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Setup | Turbulence | Turbulence Model，弹出图 2-1 所示的湍流模型设置面板。选择 RNG，单击 OK 按钮，激活 RNG k-ε 湍流模型，弹出图 2-5 所示的 RNG k-ε湍流模型输入参数面板，输入 6 个参数：Cmu、C1、C2、STCK、SCTD 和 BETA。其中 C1 对应于式（2-40）中的 C_1；Cmu、C2、STCK、SCTD 这 4 个参数含义同标准 k-ε湍流模型相同，但默认值有所不同；β 对应于 RNG 湍流模型的常数 β^{∞}，对应于卡门常数为 0.4 的情况。

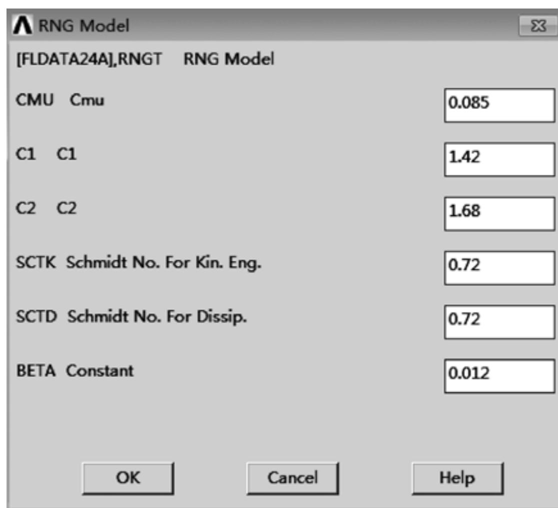


图 2-5　RNG *k-ε* 湍流模型输入参数面板

此外，η^{∞} 只能使用命令进行修改，格式如下：FLDATA24A,RNGT,ETAI,Value，其中的 Value 为用户输入的η^{∞}。浮力计算参数的设置方法与标准 k-ε 湍流模型相同。

2.5.6 NKE 湍流模型

1．理论简介

NKE 模型指定了一个变量 C_{μ}，它可以帮助减少标准 k-ε 中过高的法向应变，与标准 k-ε

模型相比，NKE 模型使用了一个不同的耗散率源项。推荐用户使用 NKE 模拟旋转流体，可以得到满意的结果。

NKE 湍流模型中的 C_μ为两个不变量的函数，即

$$C_\mu = \frac{1}{4+1.5\sqrt{\eta^2+\zeta^2}} \tag{2-41}$$

NKE 湍流模型的耗散项使用下列表达式代替式（2-33）中的耗散项 $C_{1\varepsilon}\mu_t\frac{\varepsilon}{k}\Phi$

$$\rho C_{1\varepsilon}\sqrt{2S_{ij}S_{ij}}\,\varepsilon \tag{2-42}$$

NKE 湍流模型中的耗散率式（2-33）中的常数修改为

$$C_{1\varepsilon} = \max\left(C_{1M}\frac{\eta}{\eta+5}\right) \tag{2-43}$$

其中，C2、σ_k 和 σ_ε 与标准 k-ε 湍流模型相同，但这 3 个参数的默认值与标准的 k-ε 湍流模型不同，此外该模型还附加了一个参数 C_{1M}，其为湍流动能耗散率方程中的 $C_{1\varepsilon}$ 最大允许值。表 2-3 列出了这些参数的默认值。对于 NKE 湍流模型，式（2-37）中的转动常数 C_r=3.0。

表 2-3　NKE k-ε 湍流模型计算参数

C_{1M}	C_2	σ_k	σ_ε
0.43	1.90	1.0	1.2

2．激活方法

可以使用以下方式选项激活 RNG k-ε 湍流模型：

命令：FLDATA24B,NKET

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Setup | Turbulence | Turbulence Model，弹出图 2-1 所示的湍流模型设置面板。选择 New K-E，单击 OK 按钮，激活 NKE k-ε 湍流模型，弹出图 2-6 所示的 NKE k-ε 湍流模型输入参数面板，输入 3 个参数 C1MX、C2 和 STCK。其中 C1MX 对应于式（2-43）中的 C_{1M}；C2 和 STCK 这两个参数含义同标准 k-ε 湍流模型相同，但默认值有所不同。

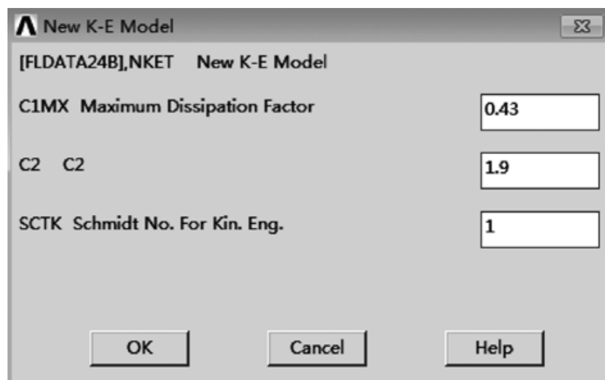


图 2-6　NKE 湍流模型输入参数面板

还有一个湍流动力耗散方程中的施密特数 σ_ε 只能使用命令进行修改，格式如下：FLDATA24,TURB,SCTD,Value，其中的 Value 为用户输入的 σ_ε。浮力计算参数的设置方法与标准 k-ε 湍流模型相同。

2.5.7 GIR 湍流模型

1．理论简介

GIR 湍流模型用于存在二次涡流的流体流动，推荐用户使用该模型模拟旋转流体，可以得到良好的结果。GIR 湍流模型使用 L_1^0～L_4 五个系数来修正湍流常数 C_μ。下面给出了 C_μ的计算流程：

1）计算 L_1^0 到 L_4

$$L_1^0=\frac{C_1^0}{2}-1,\quad L_1^1=C_1^1+1,\quad L_2=\frac{C_2}{2}-\frac{2}{3},\quad L_3=\frac{C_3}{2}-1,\quad L_4=\frac{C_4}{2}-1 \tag{2-44}$$

2）计算 p、r、Θ、q、a、b 和 D

$$p=-\frac{2L_1^0}{\frac{1}{2}\eta^2L_1^1},\quad r=\frac{L_1^0L_2}{\left(\frac{1}{2}\eta^2L_1^1\right)^2},\quad \Theta=\arccos\frac{-b/2}{\sqrt{-a^3/27}} \tag{2-45}$$

$$q=\frac{1}{\left(\frac{1}{2}\eta^2L_1^1\right)^2}\left[\left(L_1^0\right)^2+\frac{1}{2}\eta^2L_1^1L_2-\frac{1}{3}\eta^2\left(L_3\right)^2+\zeta^2\left(L_4\right)^2\right] \tag{2-46}$$

$$a=q-\frac{p^2}{3},\quad b=\frac{1}{27}\left(2p^3-9pq+27r\right),\quad D=\frac{b^2}{4}+\frac{a^3}{27} \tag{2-47}$$

根据计算系数，可得 C_μ，即

$$C_\mu=\begin{cases} L_1^0L_2/\left[\left(L_1^0\right)^2-\frac{1}{3}\eta\left(L_3\right)^2+\zeta^2\left(L_4\right)^2\right] & L_1^1=0 \text{ 或 } \eta=0 \\ -\frac{p}{3}+\left(-\frac{b}{2}+\sqrt{D}\right)^{1/3} & D>0 \\ -\frac{p}{3}+2\sqrt{\frac{-a}{3}}\cos\left(\frac{\Theta}{3}\right) & D<0,b<0 \\ -\frac{p}{3}+2\sqrt{\frac{-a}{3}}\cos\left(\frac{\Theta}{3}+\frac{2}{3}\pi\right) & D<0,b>0 \end{cases} \tag{2-48}$$

对于 GIR 模型，转动项常数 C_r 为

$$C_r=\frac{C_4-4}{C_4-2} \tag{2-49}$$

GIR 湍流模型需要输入 C_1^0、C_1^1、C_2、C_3 及 C_4，此外 σ_k 与标准 k-ε 湍流模型默认值不同。表 2-4 列出了 GIR 湍流模型参数的默认值。

表 2-4　NKE k-ε 湍流模型计算参数

C_1^0	C_1^1	C_2	C_3	C_4	σ_k
3.6	0.0	0.8	1.94	1.16	1

2．激活方法

可以使用以下方式选项激活 GIR k-ε 湍流模型：

命令：FLDATA24C,GIRT

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Setup | Turbulence | Turbulence Model，弹出图 2-1 所示的湍流模型输入参数面板。选择 Girimaji，单击 OK 按钮，激活 GIR 湍流模型，弹出图 2-7 所示的 GIR 湍流模型参数输入面板，输入 6 个参数 G0、G1、G2、G3、G4 和 SCKT。其中 G0 对应于 C_1^0，G1 对应于 C_1^1，G2 对应于 C_2，G3 对应于 C_3，G4 对应于 C_4，SCKT 对应于 σ_k。

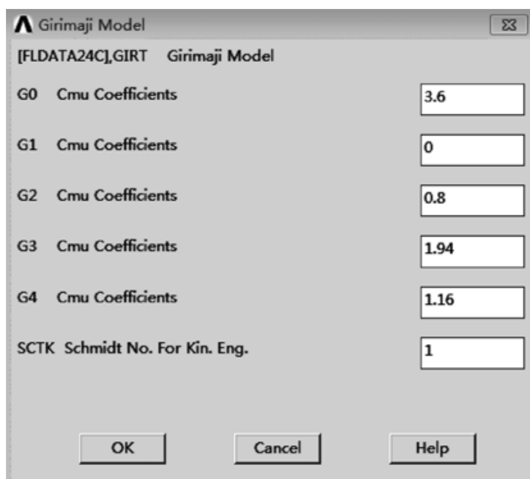


图 2-7 GIR 湍流模型输入参数面板

2.5.8 SZL 湍流模型

1．理论简介

SZL 湍流模型比 NKE 和 GIR 模型简单。该模型产生最低的湍流强度。SZL 模型数值计算精度较好，但是在一些情况中，会降低有效粘度从而对稳定性产生不利的影响。如果 SZL 模型没有产生令人满意的结果，推荐用户使用 RNG 模型。

如果流场中存在大应变情况，可以先用 RNG、NKE 或 GIR 模型，然后再试用 SZL 模型。如果 SZL 的计算结果与其他三种模型差别较大，建议用户在有严重湍流的区域加密网格。SZL 湍流模型使用下式来修改标准 k-ε 湍流模型中的 C_μ

$$C_\mu = \frac{A_{s1}}{A_{s2} + \eta + A_{s3}\zeta} \tag{2-50}$$

SZL 湍流模型需要输入 5 个参数：A_{s1}、A_{s2}、A_{s3}、σ_k 和 σ_ε，但 σ_k 和 σ_ε 与标准 k-ε 湍流模型默认值不同。表 2-5 列出了 SZL 湍流模型参数的默认值。SZL 湍流模型的转动项 C_r=4.0。

表 2-5 NKE k-ε 湍流模型计算参数

A_{s1}	A_{s2}	A_{s3}	σ_k	σ_ε
0.6666	1.25	0.9	1	1.3



2．激活方法

可以使用以下方式选项激活 SZL k-ε 湍流模型：

命令：FLDATA24D,SZLT

GUI：Main Menu｜Solution｜FLOTRAN Setup｜Turbulence｜Turbulence Model，弹出图 2-1 所示的湍流模型设置面板。选择 Shi-Zhu-Lumley，单击 OK 按钮，激活 SZL 湍流模型，弹出图 2-8 所示的 SZL 湍流模型参数输入面板，输入 5 个参数 SZL1、SZL2、SZL3、SCTK 和 SCTD。其中 SZL1 对应于 A_{s1}，SZL2 对应于 A_{s2}，SZL3 对应于 A_{s3}，SCKT 对应于 σ_k，SCTD 对应于 σ_ε。

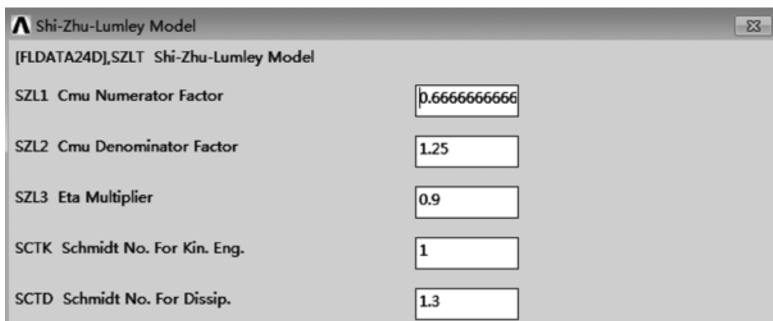


图 2-8 SZL 湍流模型输入参数面板

2.5.9 标准 k-ω湍流模型

1．理论简介

k-ω 湍流模型是最简单的湍流模型之一，能够较好地模拟湍流边界层的流动情况。但是对自由流湍流程度却非常敏感。k-ω 湍流模型求解湍流动能 k 和指定耗散率 ω。k-ω 湍流模型中的 k 表示准确的湍流动能，ω 表示湍流耗散率 ε 与湍流动能的比值，即单位湍流能量的耗散率，参见式（2-28）。湍流动能方程为

$$\begin{aligned}&\frac{\partial\rho k}{\partial t}+\frac{\partial(\rho v_x k)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v_y k)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho v_z k)}{\partial z}\\&=\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial z}\right]+\\&\mu_t\Phi-C_\mu\rho k\omega+\frac{C_4\beta\mu_t}{\sigma_k}\left[g_x\frac{\partial T}{\partial x}+g_y\frac{\partial T}{\partial y}+g_z\frac{\partial T}{\partial z}\right]\end{aligned}\tag{2-51}$$

比值耗散率方程为

$$\begin{aligned}&\frac{\partial\rho\omega}{\partial t}+\frac{\partial(\rho v_x\omega)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v_y\omega)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho v_z\omega)}{\partial z}\\&=\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\omega}\right)\frac{\partial\omega}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\omega}\right)\frac{\partial\omega}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\omega}\right)\frac{\partial\omega}{\partial z}\right]+\\&\gamma\rho\Phi-\beta'\rho\omega^2+\frac{(1-C_3)\beta\rho}{\sigma_t}\left(g_x\frac{\partial T}{\partial x}+g_y\frac{\partial T}{\partial y}+g_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)\end{aligned}\tag{2-52}$$

式（2-51）和式（2-52）的最后一项来源于标准 k-ε 模型，用于模拟浮力影响。威尔考克斯为 k-ω模型提供了默认计算常数。其中一些参数与标准 k-ε 模型相同，用户可参见表 2-1 中所列的标准湍流模型系数。k-ω 湍流模型需要输入 4 个参数：σ_k、比值耗散率方程施密特数 σ_ω 及比值耗散率方程常数 γ 和 β'。表 2-6 列出 k-ω 湍流模型参数的默认值。

表 2-6　k-ω湍流模型系数

σ_k	σ_ω	γ	β'
2.0	2.0	0.5555	0.075

2．激活方法

可以使用以下方式选项激活 k-ω 湍流模型：

命令：FLDATA24E, SKWT

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Setup | Turbulence | Turbulence Model，弹出图 2-1 所示的湍流模型设置面板。选择 K-Omega，单击 OK 按钮，激活 k-ω 湍流模型，弹出图 2-9 所示的 k-ω 湍流模型输入参数面板，输入 3 个参数 SCTK、SCTW 和 GAMA。其中 SCTK 对应于 σ_k，SCTK 对应于 σ_ω，GAMA 对应于 γ。

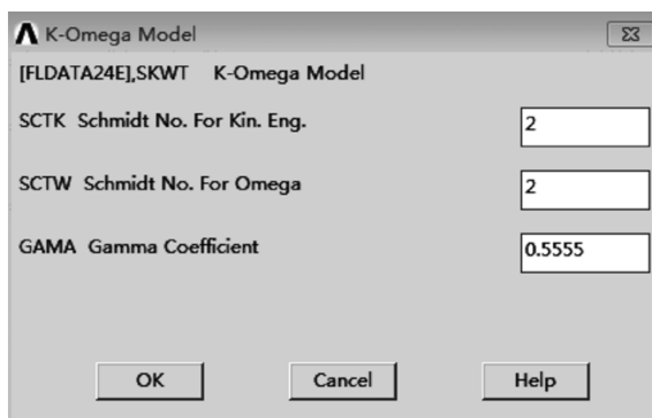


图 2-9　k-ω 湍流模型参数输入面板

此外还有一个比值耗散率方程中的比值耗散率方程常数 β' 只能使用命令进行修改，格式如下：FLDATA24E,SKWT,BETA,Valu，其中的 Value 为用户输入的 β'。

2.5.10 SST 湍流模型

1．理论简介

SST 湍流模型同时具有标准 k-ε 湍流模型和 k-ω湍流模型的优点。在近壁区计算使用 k-ω 模型，在远离壁面区域自动转换为标准 k-ε 模型。同时增加了横向耗散导数项，在湍流粘度定义中考虑了湍流剪切应力的运输过程，适用更广，可以用于带逆压梯度的流动计算、翼型计算、跨声速带激波计算等。SST 湍流模型使用下式代替式（2-51）中的 $p_t = \mu_t \Phi$，即

$$p_t = \min\left(\mu_t \Phi, C_{lmt}\varepsilon\right) \tag{2-53}$$

此外，SST 模型在比值耗散率方程中添加了一个新的耗散项：

$$\frac{(1-F_1)2\rho\sigma_{\omega 2}}{\omega}\left(\frac{\partial k}{\partial x}\frac{\partial \omega}{\partial x}+\frac{\partial k}{\partial y}\frac{\partial \omega}{\partial y}+\frac{\partial k}{\partial z}\frac{\partial \omega}{\partial z}\right) \tag{2-54}$$

式中，F_1 为混合函数，靠近壁面处 $F_1=0$；远离壁面处 $F_1=1$。

SST 模型在近壁区域自动使用 k-ω模型，在远离壁面区域自动使用 k-ε 模型。该模型的系数是关于 F_1 的函数，即有

$$\varphi = F_1\varphi_1 + (1-F_1)\varphi_2 \tag{2-55}$$

式中，φ 为 SST 模型的（σ_k、σ_ω、β'、γ）模型系数；φ_1 为 k-ω湍流模型系数；φ_2 为 k-ε 湍流模型系数。

表 2-7 列出了 SST 湍流模型的其他参数默认值。

表 2-7　SST 湍流模型系数

C_{lmt}	σ_{k1}	$\sigma_{\omega 1}$	γ_1	β_1'	σ_{k2}	$\sigma_{\omega 2}$	γ_2	β_2'
1E15	1.176	2.0	0.5532	0.075	1.0	1.168	0.4403	0.0828

2．激活方法

可以使用以下方式选项激活 SST 湍流模型：

命令：FLDATA24E, SKWT

GUI：Main Menu｜Solution｜FLOTRAN Setup｜Turbulence｜Turbulence Model，弹出图 2-1 所示的 SST 湍流模型设置面板。选择 Shear Sreess Transport，单击 OK 按钮，激活 SST 湍流模型，弹出图 2-10 所示的 SST 湍流模型输入参数面板。

Shear Stress Transport Model
Shear Stress Transport Model
[FLDATA24F],SST1 K-Omega Regime
SCTK Schmidt No. For Kin. Eng. 1.176
SCTW Schmidt No. For Omega 2
GAMA Gamma Coefficient 0.5532
BETA Beta Coefficient 0.075
[FLDATA24G],SST1 Turbulent Production Clip Factor
CLMT Production Clip Factor 1e+015
[FLDATA24H],SST2 K-Epsilon Regime
SCTK Schmidt No. For Kin. Eng. 1
SCTW Schmidt No. For Omega 1.168
GAMA Gamma Coefficient 0.4403

图 2-10　SST 湍流模型输入参数面板

SST 湍流模型参数设置面板可输入 8 个参数，分别是 k-ω 模型中的 SCTK、SCTW、GAMA 和 BETA；SST1 湍流系数 CLMT；k-ε 模型中的 SCTK、SCTW 和 GAMA。此外还有一个 k-ε 模型中的 β 只能使用命令进行修改，格式如下：FLDATA24H,SST2,BETA,Value，其

中的 Value 为用户输入的β。

2.5.11 近壁区域处理

以上 8 种湍流模型，除了零能方程模型外都要求使用近壁参数，以考虑近壁区域的流体状态。k-ω湍流模型与 SST 湍流模型中的近壁面处理方法有些细小的差别。k-ε 湍流模型对紧邻壁面区域的流体流动情况无效。壁面湍流模型用于壁面单元。给出的当前速度值在具有壁面的某一距离处平行于壁面，并且使用迭代计算方法获得壁面剪切应力。该壁面函数被称为“壁面对数定律”，即

$$\frac{v_{\tan}}{\sqrt{\frac{\tau}{\rho}}}=\frac{1}{\kappa}\left(\ln\frac{E\delta}{\nu}\sqrt{\frac{\tau}{\rho}}\right) \tag{2-56}$$

式中，$v_{\tan}$为平行壁面的速度；τ为剪应力；ν为动力粘度（m/r）；κ为壁面函数的斜率参数；E为壁面函数常数；δ为与壁面之间的距离。

其中，κ和E的默认值分别为 0.4 和 9.0，后者对应于光滑壁面条件。

由剪切应力可以计算粘度

$$\mu_{\omega}=\delta\frac{\tau}{v_{\tan}} \tag{2-57}$$

壁面附近的单元粘度值要大于层流粘度并且由式（2-57）进行计算。近壁面的湍流动能值由 k-ε 湍流模型计算获得。下式给出了近壁耗散率

$$\varepsilon_{\mathrm{nw}}=\frac{C_{\mu}^{3/4}k_{\mathrm{nw}}^{3/2}}{k\delta} \tag{2-58}$$

式中，$\varepsilon_{\mathrm{nw}}$为近壁耗散率；$k_{\mathrm{nw}}$为近壁动能。

基于湍流产生和耗散相等的原理，用户直接任意选择一类近壁公式，下式为根据该条件选择产生的近壁参数y^+的表达式

$$y^+=\frac{C_{\mu}^{1/4}\rho k_{\mathrm{nw}}^{1/2}\delta}{\mu} \tag{2-59}$$

现在，可以基于壁面参数y^+计算壁面单元有效粘度和热传导系数。

壁面的附属层流的壁面参数等于y_{t}^+，并且其默认值为 11.5，则有

$$\begin{cases}\mu_{\mathrm{eff}}=\mu\\ K_{\mathrm{eff}}=K\end{cases}\qquad y^+<y_t^+ \tag{2-60}$$

$$\mu_{\mathrm{eff}}=\frac{\mu y^+}{\frac{1}{k}\ln\left(Ey^+\right)}\qquad y^+\geqslant y_t^+ \tag{2-61}$$

$$K_{\mathrm{eff}}=\frac{C_{\mathrm{p}}}{\sigma_{\mathrm{t}}}\frac{\mu y^+}{\left[\frac{1}{k}\ln(Ey^+)+P_{\mathrm{fn}}\right]}\qquad y^+\geqslant y_t^+ \tag{2-62}$$

参数P_{fn}的定义式

$$P_{\mathrm{fn}}=\frac{(\pi/4)}{\sin(\pi/4)}\left(\frac{A}{k}\right)^{1/2}\left(\frac{P_{\mathrm{r}}}{\sigma_{\mathrm{t}}}-1\right)/\left(\frac{P_{\mathrm{r}}}{\sigma_{\mathrm{t}}}\right)^{1/4} \tag{2-63}$$

式中，P_{r} 为普朗克数；A 为 Van Driest 参数。

用不同的方法处理流体壁面区流体流动，不会影响层流的求解结果，但是剪切应力也作为壁面算法求解结果的一部分。

用户可以使用下列方式设置湍流壁面参数：

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Turbulence | Wall Parameters，弹出图 2-11 所示的湍流参数设置面板，

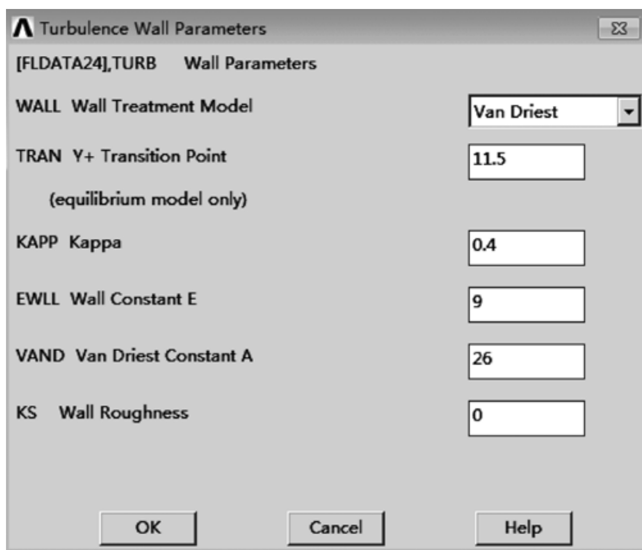


图 2-11 湍流参数输入面板

该面板包括以下 6 个设置选项：WALL——该选项用来选择壁面传导模型，默认的模型为 Van Driest，该模型多用于高普朗克的流体；第二种为 Spalding 模型，该模型适用于低普朗克模型；第三种模型为 Equilibrium 模型，对壁面粘度程序会自动引入该模型。TRAN——附属层流的外边界 y^{+}标记的赋值，仅对 Equilibrium 模型有效，默认值为 11.5；KAPP——壁面函数斜率常数，该参数是归一化剪切速度与归一化到壁面的距离曲线斜率，默认值为 0.4；EWLL——壁面函数常数，默认值为 9.0；VAND——Van Driest 模型的传导常数，默认值为 26.0。KS——单位长度上局部均匀壁面表粗糙度值，默认值为 0，壁面为光滑壁面。

2.6 压力

基于计算精度的考虑，流体动力学计算中使用相对压力而不使用绝对压力。在转动坐标系中考虑方程求解的可行性，相对压力的定义表达式为

$$p_{\mathrm{abs}}=p_{\mathrm{ref}}+p_{\mathrm{rel}}-\rho_0\vec{g}\times\vec{r}+\frac{1}{2}\rho_0\left(\vec{\omega}\times\vec{\omega}\times\vec{r}\right)\times\vec{r} \tag{2-64}$$

式中，ρ_0 为参考密度；p_{ref} 为参考压力，该压力对应于计算时的设置压力默认值为一个标准

大气压；$\bar{g}$ 为重力加速度；p_{abs} 为绝对压力；p_{rel} 为相对压力，该压力值对应于施加边界时的压力；$\bar{r}$ 为相对于旋转坐标系的流体粒子的位置矢量；$\bar{\omega}$ 为坐标系中的恒定角速度矢量。

$$\rho\frac{\mathrm{d}\bar{v}}{\mathrm{d}t}+2\rho\bar{\omega}\times\bar{v}+\rho\bar{\omega}\times\bar{\omega}\times\bar{r}= \rho\bar{g}-\nabla P_{\mathrm{abs}}+\mu\nabla^2\bar{v} \tag{2-65}$$

式中，$\bar{v}$ 为转动坐标系中的速度矢量；μ为流体粘度；ρ为流体密度。

在转动情况下，$\bar{v}$ 为表示总体坐标系中的简单速度矢量。

负梯度的绝对压力为

$$-\nabla P_{\mathrm{abs}}=-\nabla P_{rel}-\rho_0\bar{g}+\rho_0\bar{\omega}\times\bar{\omega}\times\bar{r} \tag{2-66}$$

把式（2-67）代入到流体动量方程的矢量式中，得

$$\rho\frac{\mathrm{d}\bar{v}}{\mathrm{d}t}+2\rho\bar{\omega}\times\bar{v}+(\rho-\rho_0)\bar{\omega}\times\bar{\omega}\times\bar{r} =(\rho-\rho_0)\bar{g}-\nabla P_{rel}+\mu\nabla^2\bar{v} \tag{2-67}$$

基于计算收敛的考虑，在固定的坐标系下计算输出相对压力。

第 3 章　有限元求解流体力学原理

在有限元求解流体流动过程中，使用了分离（segregated）和顺序（sequential）求解算法。该算法首先形成单元矩阵，然后组成总体矩阵，最后分别求解每一个自由度。

3.1　离散方程

动量、能量、组分传输和湍流方程都是具有一个变量传输的方程。每一类方程都包括瞬态（transient）、对流（advection）、扩散（diffusion）和源（source）项。为了统一描述后面的离散方法，使用变量 φ 进行统一表示。标量传输方程形式如下

$$\begin{aligned}&\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho C_{\phi}\phi\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho v_x C_{\phi}\phi\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\rho v_y C_{\phi}\phi\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\rho v_z C_{\phi}\phi\right)=\\&\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_{\phi}\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_{\phi}\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma_{\phi}\frac{\partial\phi}{\partial z}\right)+S_{\phi}\end{aligned} \tag{3-1}$$

式中，C_{ϕ} 为瞬态和对流系数；Γ_{ϕ} 为扩散系数；S_{ϕ} 为源项

表 3-1 列出了传输方程中的变量系数和源项。可以从连续性方程导出压力方程。

表 3-1　传输方程中参数含义

ϕ	含　义	自 由 度	C_{ϕ}	Γ_{ϕ}	S_{ϕ}
v_x	x 方向速度	VX	1	μ_e	$\rho g_x-\frac{\partial\rho}{\partial x}+R_x$
v_y	y 方向速度	VY	1	μ_e	$\rho g_y-\frac{\partial\rho}{\partial y}+R_y$
v_z	z 方向速度	VZ	1	μ_e	$\rho g_z-\frac{\partial\rho}{\partial z}+R_z$
T	温度	TEMP	C_p	κ	$\mu_t\frac{\Phi}{\mu}-\rho\varepsilon+C_4\beta\mu_t g_i\left(\frac{\partial T}{\partial x_i}\right)\sigma_t$
κ	动能	ENKE	1	$\frac{\mu}{\sigma_k}$	$Q_v+E_k+W_v+\mu\Phi+\frac{\partial\rho}{\partial t}$
ε	耗散率	ENDS	1	$\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}$	$C_1\mu_t\varepsilon\frac{\Phi}{\kappa}-C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{\kappa}+C_1C_\mu C_3\beta\kappa g_i\left(\frac{\partial T}{\partial x_i}\right)/\sigma_t$
Y_i	组分质量分数	SP01-6	1	ρD_{mi}	0

因此，离散过程包括产生单元矩阵，并且最后要把单元矩阵合成总体矩阵。

$$\left(\left[A_e^{\text{transient}}\right]+\left[A_e^{\text{advection}}\right]+\left[A_e^{\text{diffusion}}\right]\right)\left\{\phi_e\right\}=\left\{S_e^{\phi}\right\} \tag{3-2}$$

伽辽金加权残值法被用来形成单元积分方程。将 W^e 记为单元权函数，也称为单元形函数。

3.2 瞬态项

单元矩阵的第一项为瞬态项，其一般表达式为：

$$\left[A_e^{\text{transient}}\right]=\int W^e \frac{\partial\left(\rho C_\phi \phi\right)^e}{\partial t}\mathrm{d}\left(vol\right) \tag{3-3}$$

对于节点 i，则有

$$\int W^e \frac{\partial\left(\rho C_\phi \phi\right)^e}{\partial t}\mathrm{d}\left(vol\right)=\int W_i^e \rho C_\phi W_j \mathrm{d}(vol)\frac{\partial \phi_j^e}{\partial t}+\int W_i^e \frac{\partial\left(\rho C_\phi\right)}{\partial t} W \sum{}_j^e \mathrm{d}(vol)\phi_j^e \tag{3-4}$$

下角标 i 和 j 为节点号。如果忽略式（3-4）中的第二项，则一致质量矩阵的表达式为

$$M_{ij}=\int W_i^e \rho C_\phi W_j^e \mathrm{d}(vol) \tag{3-5}$$

如果使用集中质量矩阵，则质量矩阵为

$$M_{ij}=\delta_{ij}\int W_i^e \rho C_\phi \mathrm{d}(vol) \tag{3-6}$$

式中，δ_{ij} 为 Kronecker 符号，当 $i \neq j$ 时，δ_{ij}=0；当 $i=j$ 时，δ_{ij}=1。

用户使用下列方法选择质量矩阵类型：

命令：FLDATA38

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Transient Ctrl | Mass Type，弹出图 3-1 所示的选择质量矩阵类型的设置面板。用户可在该面板上设置动量方程（Momentum equations）、湍流方程（Turbulent equations）、压力方程（Pressure equation）和能量方程（Energy equation）中质量方程类型：LUMP 为集中质量矩阵，CONS 为一致质量矩阵。

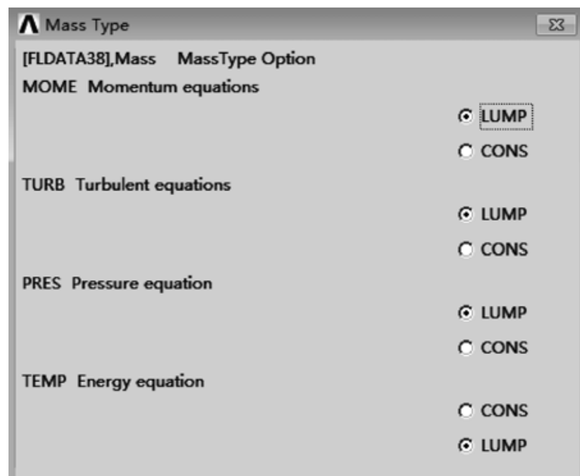


图 3-1 选择质量矩阵类型的设置面板

程序提供了两种时间积分方法：纽马克法和向后差分法。如果用户选择了纽马克积分方法，则节点公式使用隐式公式。下式中的当前时间步为第 n 个时间步，并且该表示式中包含了前一个时间步的结果

$$(\rho\phi)_n = (\rho\phi)_{n-1} + \Delta t\left\{\delta\left[\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}\right]_n + (1-\delta)\left[\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}\right]_{n-1}\right\} \tag{3-7}$$

式中，δ 为纽马克方法中的时间积分系数。

式（3-7）可以被重新改写为

$$\left[\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}\right]_n = \frac{1}{\Delta t\delta}(\rho\phi)_n - \frac{1}{\Delta t\delta}(\rho\phi)_{n-1} + \left(1-\frac{1}{\delta}\right)\left[\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}\right]_{n-1} \tag{3-8}$$

如果用户选择了向后差分法，则节点公式使用隐式公式。下式中的当前时间步为第 n 个时间步，并且该表示式中包含了前两个时间步的结果

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = \frac{(\rho\phi)_{n-2}}{2\Delta t} - \frac{4(\rho\phi)_{n-1}}{2\Delta t} + \frac{3(\rho\phi)_n}{2\Delta t} \tag{3-9}$$

对于 VOF 分析，则式（3-9）被修正为仅有当前时间步和前一个时间步，即

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = \frac{(\rho\phi)_n}{\Delta t} - \frac{(\rho\phi)_{n-1}}{\Delta t} \tag{3-10}$$

以上的一阶时间差分算法与当前的 VOF 对流算法相一致。

用户使用下列方法选择瞬态计算积分方法：

命令：FLDATA4

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Transient Ctrl | Time Integration Meth，弹出图 3-2 所示的选择瞬态计算积分方法选择面板，在面板上用户可以选项时间积分为向后差分法（Backward）和纽马克方法（Newmark）。

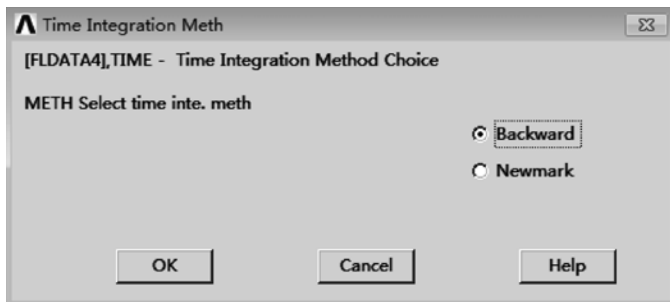


图 3-2　选择瞬态计算积分方法选择面板

3.3　对流项

目前，FLOTRAN 提供了单调流线迎风法、流线迎风/Petro-Galerkin 方法和修正 Galerkin 方法三种方法用来离散对流项，用户可以使用 MSADV 进行选择。单调迎风算法（MSU）具有一阶精度并且倾向于产生光滑和单调的求解结果。流线迎风/Petro-Galerkin 方法和修正 Galerkin 金方法具有二阶精度并且求解结果倾向于振荡的求解结果。

3.3.1　单调流线迎风法（MSU）

单调流线迎风法是基于沿着特征线完全对流输送的思想处理对流项的。该方法非常适用

于已知流速场的对流输出计算，如图 3-3 所示。

可以将速度场本身假设为流场中每一处的流线与速度矢量相切。因此，对流项可以被表示为流线速度。

在完全对流输送中，一个假设是在特征线之间不发生输送，即只沿着流线发生输送。因此，对流项具有以下关系

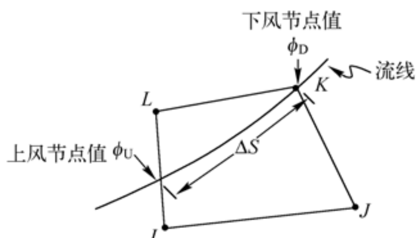


图 3-3　流线迎风方法

$$\frac{\partial\left(\rho C_{\phi} v_x \phi\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\rho C_{\phi} v_y \phi\right)}{\partial y}+\frac{\partial\left(\rho C_{\phi} v_z \phi\right)}{\partial z}=\frac{\partial\left(\rho C_{\phi} v_s \phi\right)}{\partial s} \tag{3-11}$$

当沿着流线表示时，在整个单元中对流项为常数，即

$$\left[A_e^{\text{advection}}\right]=\frac{\mathrm{d}\left(\rho C_{\phi} v_s \phi\right)}{\mathrm{d}s}\int W^e \mathrm{d}(vol) \tag{3-12}$$

对每一个单元应用该公式，并且每个单元中仅有一个节点对单元有贡献。使用简化差分计算导数

$$\frac{d\left(\rho C_{\phi} v_s\right)}{ds}=\frac{\left(\rho C_{\phi} v_s \phi\right)_U-\left(\rho C_{\phi} v_s \phi\right)_D}{\Delta s} \tag{3-13}$$

式中，D 为下风节点的下标值；U 为上风节点的下标值；Δs 为上风节点与下风节点间的距离。

虽然上风位置的值是未知的，但是如图 3-3 所示，上风位置处的值可以用节点处的未知值进行表示，在整个流场单元中，确定完上风节点位置就可以进一步确定下风节点位置的值。

3.3.2 流线迎风/Petro-Galerkin 方法（SUPG）

SUPG 方法的控制方程由 Galerkin 离散对流项和一个附加扩散项组成。该附加扩散项仅作用于流场的对流方向，即有

$$\begin{aligned}\left[A_e^{\text{advection}}\right]=&\int W^e\left\{\frac{\partial\left(\rho v_x C_{\phi}\phi\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\rho v_y C_{\phi}\phi\right)}{\partial y}+\frac{\partial\left(\rho v_z C_{\phi}\phi\right)}{\partial z}\right\}\mathrm{d}(vol)+\\&C_{2\tau}\int\frac{zh}{2U_{\text{mag}}}\left\{\frac{v_x\partial W^e}{\partial x}+\frac{v_y\partial W^e}{\partial y}+\frac{v_z\partial W^e}{\partial z}\right\}\left\{\frac{v_x\partial\left(\rho C_{\phi}\phi\right)}{\partial x}+\frac{v_x\partial\left(\rho C_{\phi}\phi\right)}{\partial y}+\frac{v_z\partial\left(\rho C_{\phi}\phi\right)}{\partial z}\right\}\mathrm{d}(vol)\end{aligned} \tag{3-14}$$

式中，$\int W^e\left\{\frac{\partial\left(\rho v_x C_{\phi}\phi\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\rho v_y C_{\phi}\phi\right)}{\partial y}+\frac{\partial\left(\rho v_z C_{\phi}\phi\right)}{\partial z}\right\}\mathrm{d}(vol)$ 为 Galerkin 离散对流项；$C_{2\tau}\int\frac{zh}{2U_{mag}}\left\{\frac{v_x\partial W^e}{\partial x}+\frac{v_y\partial W^e}{\partial y}+\frac{v_z\partial W^e}{\partial z}\right\}\left\{\frac{v_x\partial\left(\rho C_{\phi}\phi\right)}{\partial x}+\frac{v_x\partial\left(\rho C_{\phi}\phi\right)}{\partial y}+\frac{v_z\partial\left(\rho C_{\phi}\phi\right)}{\partial z}\right\}\mathrm{d}(vol)$ 为附加扩散项；$C_{2\tau}$ 为总体系数，设置为 1.0；h 为对流方向的单元长度；$U_{\text{mag}}=\sqrt{v_x^2+v_y^2+v_z^2}$；$z=1$ 时，$0\leqslant Pe<3$；$z=Pe/3$ 时，$Pe\geqslant 3$；$Pe=\frac{\rho C_{\phi}U_{\text{mag}}^h}{2\Gamma_{\phi}}=\text{Pleclet number}$。

由以上计算过程可知，SUPG 方法要求流场网格细化，从而可使附加扩散项趋于 0，并

且 Galerkin 公式具有二阶精度。附加扩散项为 SUPG 方法提供了必要的稳定性，而在完全 Galerkin 方法中没有该项。

3.3.3 修正 Galerkin 方法（COLG）

COLG 方法的离散算法与 SUPG 相同，但是增加了一个修正概念。在 COLG 方法中，引入基于单元节点的二阶速度概念。基于单元节点速度被用来满足连续性方程，而传统速度被用来满足动量方程。即有

$$\left[A_e^{\text{advection}}\right]=\int W^e\left\{\frac{\partial\left(\rho v_x^e C_\phi \phi\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\rho v_y^e C_\phi \phi\right)}{\partial y}+\frac{\partial\left(\rho v_z^e C_\phi \phi\right)}{\partial z}\right\}\mathrm{d}(vol)+$$
$$C_{2\tau}\int\frac{zh}{2U_{\text{mag}}^e}\left\{\frac{v_x^e\partial W^e}{\partial x}+\frac{v_y^e\partial W^e}{\partial y}+\frac{v_z^e\partial W^e}{\partial z}\right\} \tag{3-15}$$
$$\left\{\frac{v_x^e\partial\left(\rho C_\phi \phi\right)}{\partial x}+\frac{v_y^e\partial\left(\rho C_\phi \phi\right)}{\partial y}+\frac{v_z^e\partial\left(\rho C_\phi \phi\right)}{\partial z}\right\}\mathrm{d}(vol)$$

式（3-15）中的所有参数含义与式（3-14）中相同。

在该种方法中，通过基于单元节点速度导出压力方程，并且压力方程通常是轴对称的，即便是对于不可压缩流体问题。对应静态的不可压缩流体流动问题，即便是模型的有限元网格比较粗糙，COLG 方法也会得到较精确的解答。

用户使用下列方法选择对流项算法：

命令：FLDATA33

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Advection，弹出图 3-4 所示的对流项算法选择面板，用户可在该面板上设置动量方程（Momentum equations）、湍流方程（Turbulent equations）、压力方程（Compress pressure equation）和能量方程（Energy equation）的算法。每个方程可以从单调流线迎风法（MSU）、流线迎风/Petro-Galerkin 法（SUPG）和修正 Galerkin 方法（GOLG）这 3 种算法中选择一种。

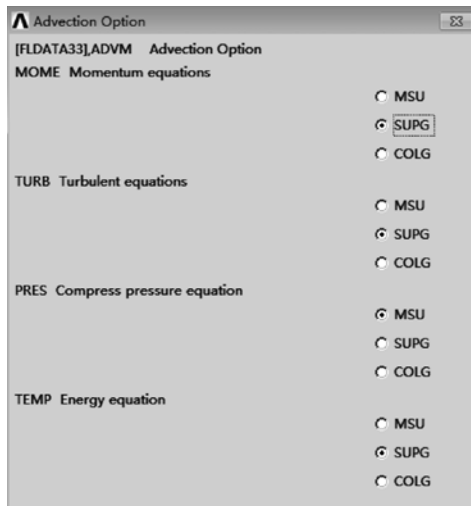


图 3-4 对流项算法选择面板



3.4 扩散项

扩散项为权函数乘以扩散项后在问题域中进行积分，即

$$扩散贡献=\int W^e\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\phi\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)\mathrm{d}(vol)+\int W^e\frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_\phi\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)\mathrm{d}(vol)+\int W^e\frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma_\phi\frac{\partial\phi}{\partial z}\right)\mathrm{d}(vol) \tag{3-16}$$

对于扩散项 x、y 和 z 项的处理方式相同。因此，以 x 项为例讲解离散过程。使用分部积分法，得

$$\int W^e\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\phi\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)\mathrm{d}(vol)=\int\frac{\partial W^e}{\partial x}\Gamma_\phi\frac{\partial\phi}{\partial x}\mathrm{d}(vol) \tag{3-17}$$

一旦ϕ值的导数被节点值和权重函数的导数所取代，则节点值将被从积分符号中移除。有

$$\frac{\partial\phi}{\partial x}=W_x^e\phi \tag{3-18}$$

$$W_x^e=\frac{\partial W^e}{\partial x} \tag{3-19}$$

现在扩散项可以表示为

$$\left[A_e^{\text{diffusion}}\right]=\int(W_x^e\Gamma_\phi W_x^e+W_y^e\Gamma_\phi W_y^e+W_z^e\Gamma_\phi W_z^e)\mathrm{d}(vol) \tag{3-20}$$

3.5 源项

源项的离散方法仅把权函数放入积分中即可，如下所示

$$S_\phi^s=\int W^e S_\phi\mathrm{d}(vol) \tag{3-21}$$

3.6 分离解求解算法

以顺序方式求解每一个自由度。由于方程是耦合的，因此每一个方程使用其他自由度的中间值进行求解。按顺序求解所有方程，然后更新流体属性参数这个过程称为一次总体迭代。在展示全部总体迭代算法结构之前，有必要给读者详细介绍一下每一个方程的形成过程。

上一节给用户介绍了每一个方程的离散方程，但是除了压力方程。压力方程通过分离速度—压力求解算法获得。

FLOTRAN 的求解流体算法为通用经典的求解压力耦合方程的半隐式方法，简称SIMPLE。FLOTRAN 提供了两种分离求解算法。一种是原始 SIMPLEF 算法，另一种为增强型 SIMPLEN 算法。可压缩流体算法是不可压缩流体算法的特殊情况。通过线性化过程并分别考虑密度和速度的变化来近似估计从一次迭代到另一次迭代中密度与速度乘积的变化。使用*表示上一次迭代产生的计算值，例如 x 方向，则有下列表达式：

$$\rho v_x=\rho v_x^*+\rho^*v_x-\rho^*v_x^* \tag{3-22}$$

连续性方程变为

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho^{*}v_{x}\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\rho v_{x}^{*}\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\rho^{*}v_{y}\right)}{\partial y}+\frac{\partial\left(\rho v_{y}^{*}\right)}{\partial y}+ \\ \frac{\partial\left(\rho^{*}v_{z}\right)}{\partial z}+\frac{\partial\left(\rho v_{z}^{*}\right)}{\partial z}-\frac{\partial\left(\rho^{*}v_{x}^{*}\right)}{\partial x}-\frac{\partial\left(\rho^{*}v_{y}^{*}\right)}{\partial y}-\frac{\partial\left(\rho^{*}v_{z}^{*}\right)}{\partial z}=0 \quad (3\text{-}23)$$

使用理想气体中压力与密度的关系，可以将连续性方程中的瞬态项变为下式

$$\int W^{e}\frac{\partial\rho}{\partial t}\mathrm{d}(vol)=\frac{\partial}{\partial t}\int W^{e}\frac{p}{RT}\mathrm{d}(vol) \quad (3\text{-}24)$$

使用向后差分法可以直接求解该项。

使用 Galerkin 方法求解其他项

$$\int W\left[\frac{\partial\left(\rho^{*}v_{x}\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\rho^{*}v_{y}\right)}{\partial y}+\frac{\partial\left(\rho^{*}v_{z}\right)}{\partial z}\right]\mathrm{d}(vol)+ \\ \int W\left[\frac{\partial\left(\rho v_{x}^{*}\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\rho v_{y}^{*}\right)}{\partial y}+\frac{\partial\left(\rho v_{z}^{*}\right)}{\partial z}\right]\mathrm{d}(vol)- \\ \int W\left[\frac{\partial\left(\rho^{*}v_{x}^{*}\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\rho^{*}v_{y}^{*}\right)}{\partial y}+\frac{\partial\left(\rho^{*}v_{z}^{*}\right)}{\partial z}\right]\mathrm{d}(vol) \quad (3\text{-}25)$$

式（2-25）中共有三组积分表达项。在第一组积分表达式中，使用分部积分法将未知新速度从被积函数中的导数项中移出。使用分部积分法后，第一组积分表达式变为

$$\int W\left[\frac{\partial\left(\rho^{*}v_{x}\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\rho^{*}v_{y}\right)}{\partial y}+\frac{\partial\left(\rho^{*}v_{z}\right)}{\partial z}\right]\mathrm{d}(vol) \\ =\int W\left[\rho^{*}v_{x}+\rho^{*}v_{y}+\rho^{*}v_{z}\right]\mathrm{d}(area)- \\ \int\left[\left(\rho^{*}v_{x}\right)\frac{\partial W}{\partial x}+\left(\rho^{*}v_{y}\right)\frac{\partial W}{\partial y}+\left(\rho^{*}v_{z}\right)\frac{\partial W}{\partial z}\right]\mathrm{d}(vol) \quad (3\text{-}26)$$

在第二组积分表达式中，以 x 方法为例，可以将未知的密度用压力表示

$$\int W\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho v_{x}^{*}\right)\mathrm{d}(vol)=\int\frac{W}{R}\frac{\partial}{\partial x}\left(v_{x}^{*}\frac{p}{T}\right)\mathrm{d}(vol) \quad (3\text{-}27)$$

在第三组积分表达式中，使用上一次迭代的值计算积分。下一步，根据压力梯度导出速度表达式。当动量方程被求解后，就可以获得前一个迭代的压力值。假设系数矩阵由以前的瞬态，对流和扩散项组成，则可以写出关于动力方程的代数方程组，除了压力梯度项，所有的源项都可以被计算。即

$$Av_{x}=s_{\phi}-\sum_{e=1}^{E}W\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)^{e}\mathrm{d}(vol) \quad (3\text{-}28)$$

$$Av_{y}=s_{\phi}-\sum_{e=1}^{E}W\left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)^{e}\mathrm{d}(vol) \quad (3\text{-}29)$$

$$Av_z = s_\phi - \sum_{e=1}^{E} W\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)^e \mathrm{d}(vol) \tag{3-30}$$

以上这些项表示了含有 N 个未知速度的 N 个代数方程组。使用角标 i 表示节点方程，i 的取值范围从 1 到 N，N 为流体节点的数量；角标 j 表示 i 的相邻节点。

对于 SIMPLEF 算法

$$v_{xi} = \hat{v}_{xi} - \frac{1}{a_{ii}^x}\int W\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)\mathrm{d}(vol) \tag{3-31}$$

$$v_{yi} = \hat{v}_{yi} - \frac{1}{a_{ii}^y}\int W\left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)\mathrm{d}(vol) \tag{3-32}$$

$$v_{zi} = \hat{v}_{zi} - \frac{1}{a_{ii}^z}\int W\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)\mathrm{d}(vol) \tag{3-33}$$

对于 SIMPLEN 算法

$$v_{xi} = \hat{v}_{xi} - \frac{1}{\dfrac{a_{ii}^x}{r^x} + \sum_j^{j\neq i} a_{ij}^x}\int_\Omega W\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)\mathrm{d}(vol) \tag{3-34}$$

$$v_{yi} = \hat{v}_{yi} - \frac{1}{\dfrac{a_{ii}^y}{r^y} + \sum_j^{j\neq i} a_{ij}^y}\int_\Omega W\left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)\mathrm{d}(vol) \tag{3-35}$$

$$v_{zi} = \hat{v}_{zi} - \frac{1}{\dfrac{a_{ii}^z}{r^z} + \sum_j^{j\neq i} a_{ij}^z}\int_\Omega W\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)\mathrm{d}(vol) \tag{3-36}$$

对于 SIMPLEF 算法

$$\hat{v}_{xi} = \frac{-\sum_j^{j\neq i} a_{ij}^x v_{xj} + S_x}{a_{ii}^x} \tag{3-37}$$

$$\hat{v}_{yi} = \frac{-\sum_j^{j\neq i} a_{ij}^y v_{yj} + S_y}{a_{ii}^y} \tag{3-38}$$

$$\hat{v}_{zi} = \frac{-\sum_j^{j\neq i} a_{ij}^z v_{zj} + S_z}{a_{ii}^z} \tag{3-39}$$

对于 SIMPLEN 算法

$$\hat{v}_{xi} = \frac{-\sum_j^{j\neq i} a_{ij}^x (v_{xj} - v_{xi}) + b_i^x}{\dfrac{a_{ii}^x}{r^x} + \sum_j^{i\neq j} a_{ij}^x} \tag{3-40}$$

$$\hat{v}_{yi}=\frac{-\sum_{j}^{j\neq i}a_{ij}^{y}(v_{yj}-v_{yi})+b_{i}^{y}}{\dfrac{a_{ii}^{y}}{r^{y}}+\sum_{j}^{i\neq j}a_{ij}^{y}} \tag{3-41}$$

$$\hat{v}_{zi}=\frac{-\sum_{j}^{j\neq i}a_{ij}^{z}(v_{zj}-v_{zi})+b_{i}^{z}}{\dfrac{a_{ii}^{z}}{r^{z}}+\sum_{j}^{i\neq j}a_{ij}^{z}} \tag{3-42}$$

式中，a_{ij} 为三个动量方程中对应于 x、y 和 z 的系数矩阵；r 为松弛因子；b_i 为考虑松弛因子的修正源项。

为了表达方便，每一个节点的相邻速度从求解动量方程中获得。基于该点，假设单元中的压力梯度为常数，因此可以从积分符号中移出。因此，仅有单元权函数需要进行积分计算，允许根据动量方程和权函数的积分中的主对角项定义压力系数。

对于 SIMPLEF 算法

$$M_{x}=\frac{1}{a_{ii}^{x}}\sum_{e=1}^{N}W\mathrm{d}(vol) \tag{3-43}$$

$$M_{y}=\frac{1}{a_{ii}^{y}}\sum_{e=1}^{N}W\mathrm{d}(vol) \tag{3-44}$$

$$M_{z}=\frac{1}{a_{ii}^{z}}\sum_{e=1}^{N}W\mathrm{d}(vol) \tag{3-45}$$

对于 SIMPLEN 算法

$$M_{x}=\frac{1}{\dfrac{a_{ii}^{x}}{r^{x}}+\sum_{j}^{j\neq i}a_{ij}^{x}}\sum_{e=1}^{N}W\mathrm{d}(vol) \tag{3-46}$$

$$M_{y}=\frac{1}{\dfrac{a_{ii}^{y}}{r^{y}}+\sum_{j}^{j\neq i}a_{ij}^{y}}\sum_{e=1}^{N}W\mathrm{d}(vol) \tag{3-47}$$

$$M_{z}=\frac{1}{\dfrac{a_{ii}^{z}}{r^{z}}+\sum_{j}^{j\neq i}a_{ij}^{z}}\sum_{e=1}^{N}W\mathrm{d}(vol) \tag{3-48}$$

因此，由压降（pressure drop）和压力系数（pressure coefficient）可以获得未知节点速度的表达式

$$v_{x}=\hat{v}_{x}-M_{x}\frac{\partial p}{\partial x} \tag{3-49}$$

$$v_{y}=\hat{v}_{y}-M_{y}\frac{\partial p}{\partial y} \tag{3-50}$$

$$v_z = \hat{v}_z - M_z \frac{\partial p}{\partial z} \tag{3-51}$$

以上表达式被用来替换连续方程中的未知速度，将连续方程转换成压力方程。来自于未知速度（使用压力梯度项进行代替）和未知密度（用压力进行表示）的项组成了压力方程中的系数矩阵，而其他项将产生强迫函数（forcing function）。

以单元为基础可以得到整体压力方程，使用节点压力和权函数的导数代替压力梯度，把所有压力项放在左侧，并且其他项放在右侧，得

$$\begin{aligned}
&[P]^e \int \left[\frac{\partial W}{\partial x} \rho^* M_x \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial y} \rho^* M_y \frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \rho^* M_z \frac{\partial W}{\partial z} \right] \mathrm{d}(vol)^e + \\
&\int \frac{W}{R} \left[\frac{\partial}{\partial x}\left(v_x^* \frac{P}{T} \right) + \frac{\partial}{\partial Y}\left(v_Y^* \frac{P}{T} \right) + \frac{\partial}{\partial Z}\left(v_Z^* \frac{P}{T} \right) \right] \mathrm{d}(vol)^e \\
&= \int \left[\frac{\partial W}{\partial x} \rho^* \hat{v}_x + \frac{\partial W}{\partial y} \rho^* \hat{v}_y + \frac{\partial W}{\partial z} \rho^* \hat{v}_z \right] \mathrm{d}(vol)^e + \\
&\int W \left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho^* v_x^* \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\rho^* v_y^* \right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\rho^* v_z^* \right) \right] \mathrm{d}(vol)^e - \\
&\int W \left[\rho^* v_x \right]^s d(area)^s - \int W \left[\rho^* v_y \right]^s d(area)^s - \int W \left[\rho^* v_z \right]^s \mathrm{d}(area)^s
\end{aligned} \tag{3-52}$$

在不可压缩的情况下，上面的等式的第二和第四行消失，因为等式（3-22）中定义的线性化是不必要的。第二行被视为具有相同的对流算法，该算法用于动量方程

最后一步是更新速度。完成对压力方程的求解后，获得的压力被用来计算压力梯度。为了确保存在的速度场中的质量守恒，将压力项重新添加入含有上画线的速度中。

对于 SIMPLEF 算法

$$v_x = \hat{v}_x - \frac{1}{a_{ii}^x} \int \left(W \frac{\partial W}{\partial x} \right) \mathrm{d}(vol)^e [P]^e \tag{3-53}$$

$$v_y = \hat{v}_y - \frac{1}{a_{ii}^y} \int \left(W \frac{\partial W}{\partial y} \right) \mathrm{d}(vol)^e [P]^e \tag{3-54}$$

$$v_z = \hat{v}_z - \frac{1}{a_{ii}^z} \int \left(W \frac{\partial W}{\partial z} \right) \mathrm{d}(vol)^e [P]^e \tag{3-55}$$

对于 SIMPLEN 算法

$$v_x = \hat{v}_x - \frac{1}{\dfrac{a_{ii}^x}{r^x} + \sum_{j}^{j \neq i} a_{ij}^x} \int \left(W \frac{\partial W}{\partial x} \right) \mathrm{d}(vol)^e [P]^e \tag{3-56}$$

$$v_y = \hat{v}_y - \frac{1}{\dfrac{a_{ii}^y}{r^y} + \sum_{j}^{j \neq i} a_{ij}^y} \int \left(W \frac{\partial W}{\partial y} \right) \mathrm{d}(vol)^e [P]^e \tag{3-57}$$

$$v_z = \hat{v}_z - \frac{1}{\dfrac{a_{ii}^z}{r^z} + \sum_{j}^{j \neq i} a_{ij}^z} \int \left(W \frac{\partial W}{\partial z} \right) \mathrm{d}(vol)^e [P]^e \tag{3-58}$$

将总体迭代过程总结如下：

1）假定一个初始流体速度分布，记作$\hat{v}_x$、$\hat{v}_y$和$\hat{v}_z$。

2）使用$\hat{v}_x$、$\hat{v}_y$和$\hat{v}_z$计算压力方程。

3）求解压力方程，得到p。

4）基于$\hat{v}_x$、$\hat{v}_y$、$\hat{v}_z$和p更新速度。

5）求解能量方程，得到T。

6）求解组分传输方程。

7）根据得到的温度更新与温度相关的流体属性参数。

8）求解湍流方程，得到湍流动能k和湍流动能耗散率ε。

9）基于湍流动能和耗散率更新有效粘度。

10）检查各自由度的收敛情况。

11）终止总体迭代。



第 4 章 FLOTRAN 求解器

前面给读者介绍了 FLOTRAN 离散方法和数值求解方法，本章将为读者介绍求解形成的代数方程组方法。在顺序求解算法中，每一次总体迭代都需要重复求解矩阵方程。在一些情况中，必须获得精确解答，然而在另一些情况中，近似的数值求解就能够满足要求。在某些情况下，不需要求解所有方程。对于动量方程，通过快速计算近似解可以节约计算时间。对于压力方程，需要精确求解才能满足质量守恒。在具有恒定流体属性参数的热分析中，直到流体问题收敛后，才开始计算能量方程。

FLOTRAN 提供了三类求解器：

（1）快速近似求解器

该求解器称为 TDMA，使用三角矩阵算法，执行用户指定的迭代次数，用于动量方程中速度的求解，这也是默认设置。该求解器需要较少的时间和内存。

（2）精确求解器

该类求解器使用半直接共轭梯度法进行迭代计算直到满足指定的收敛准则。该类求解器包括共轭残差法（CR）、预条件共轭残差法（PCCR）、预条件广义极小残值法（PGMR）、处理非对称矩阵方程的预条件 BiCGStab 法（PBCGM）和预条件共轭梯度法（Precond congrad），该方法适用于求解不可压缩流体压力方程。

（3）稀疏矩阵直接求解器

该求解器使用高斯消元法因式分解矩阵，然后使用向后/向前替换方法来求解未知数，该求解器需要较多的时间和占用较多的内存。

4.1 TDMA 求解器

用户可用下列方式选择 TDMA 求解器：

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | CFD Solver Controls | DOF，弹出求解器选择面板，选择 TDMA，单击 OK 按钮，则激活 TDMA 求解器。

TDMA 求解器使用三角矩阵算法求解代数方程组。TDMA 求解器为求解速度的默认求解，建议用户不要使用该求解器求解压力方程，因为 TDMA 求解器为快速求解器，只能得到近似解答，不能得到精确解。而对于压力方程，使用该求解器得出的计算结果难以满足流体的质量守恒。TDMA 求解器只有一个控制参数：迭代次数。对于求解动量方程，迭代次数默认为 1，并且不能修改。图 4-1 所示为 TDMA 控制参数设置面板，通过该面板可以设置求解压力方程、温度方程、湍流动能方程和湍流动能耗散率方程的迭代次数。对于压力方程和温度方程，TDMA 的默认迭代次数为 100，对于湍流动能和湍流动能耗散率方程，TDMA 的默认迭代次数为 10。

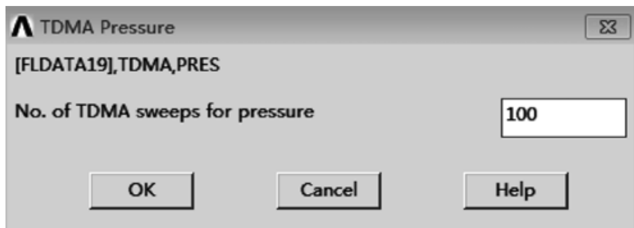


图 4-1　TDMA 控制参数设置面板

4.2　共轭残差求解器

用户可用下列方式选择共轭残差求解器：

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | CFD Solver Controls | DOF，弹出求解器选择面板，选择 Conj residua，单击 OK 按钮，则激活共轭残差求解器，并弹出图 4-2 所示的共轭残差求解器控制参数设置面板，该面板包括四个控制参数。

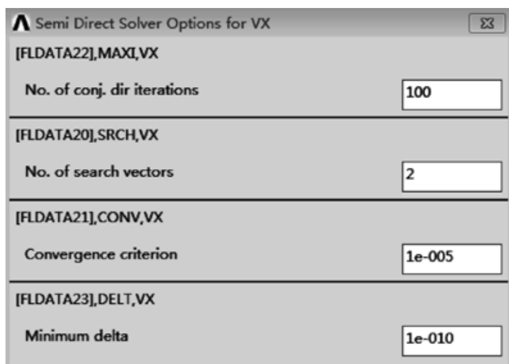


图 4-2　共轭残差求解器控制参数设置面板

（1）MAXI 参数

该参数用来设置最大迭代次数，对于求解速度默认值为 100，对于求解压力方程和温度方程的默认值为 1000。如果达到了设置的最大迭代次数，但是还没有满足收敛准则，则会弹出警告，而程序会正常进行继续计算。

（2）SRCH 参数

该参数用来设置搜索矢量数量，对于求解动量方程、压力方程、温度方程、湍流动能方程和湍流动能耗散率方程的默认值都为 2。默认设置可以满足求解条件良好的问题。对于不同的问题，要求使用的搜索方向的数量可能不同。有时可能需要指定 20 个搜索方向，但是用户需要注意每一个指定的方向需要在内存中存储 N 个节点信息。（N 是模型中有限单元节点的数量）．因此，对于较大的 SRCH 值，可能会出现计算需要求内存大于用户提供的内存，对于这种情况应该使用惯性松弛。共轭方向迭代算法使用了线性组合搜索方向求解技术。

（3）CONV 参数

该参数用来设置收敛准则因子，对于求解速度，湍流动能和湍流动能耗散方程的默认值为 1×10^{-5}，对于求解压力方程和温度方程的默认值为 1×10^{-12}。收敛准则因子代表了每一次总体迭代计算过程中的残差矢量内积，简称参数 RTR，对于不可压缩流体方程简称为 ZTR。对于求解速度该参数没有太多的限制，因为对于速度不需要进行精确求解。

（4）DELT 参数

该参数用来设置最小的归一化的变化率，默认值为 1×10^{-10}。该参数将允许半直接方法继续求解。如果求解发生障碍，则可以使用 DELT 终止半直接求解器求解。如果计算停止了，则求解器仅增加很少数量的解答，尽管事实上还没有实现正确的求解。求解中的最大节点差别被归一化成一个变量并与 DELT 进行比较。

由于较小的变化率导致代数方程求解器终止被认为是一种正常的功能并没有任何警告信息而会被打印。FLOTRAN 继续正常运行。如果 RTR 的值不会显著降低并且最后一次迭代产生的 DelMax 值小于用户指定的值，这表明求解基本不会发生变化，并且即使进一步努力计算也是浪费计算时间的。



该四个求解控制参数是所有半直接求解器控制的基本参数。

4.3　预条件共轭残差求解器

用户可用下列方式选择预条件共轭残差求解器：

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | CFD Solver Controls | DOF，弹出求解器选择面板，选择 Precond conj res，单击 OK 按钮，则激活预条件共轭残差求解器，并弹出预条件共轭残差求解器控制参数设置面板，该求解器面板包括四个控制参数，其含义与在共轭残差求解器中的一样。

4.4　共轭梯度求解器

共轭梯度求解器主要用来求解不可压缩流体，如果激活了求解不可压缩流体选项，则可用下列方式选择共轭梯度求解器：

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | CFD Solver Controls | DOF，弹出求解器选择面板，选择 Precond con grad，单击 OK 按钮，则激活共轭梯度求解器，并弹出图 4-3 所示的共轭梯度求解器控制参数设置面板，该面板包括三个控制参数，其含义与共轭残差求解器中的一样。共轭梯度求解器只用来求解不可压缩流体。对于速度方程、温度方程、湍流动能方程和湍流动能耗散率方程则不能使用该求解器。

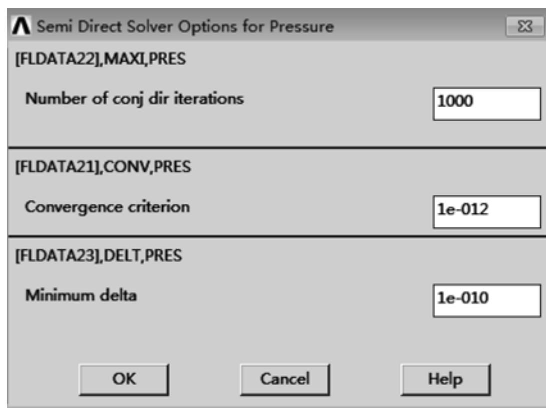


图 4-3　共轭梯度求解器控制参数设置面板

4.5　预条件广义极小残差求解器

用户可用下列方式选择预条件共轭残差求解器：

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | CFD Solver Controls | DOF，弹出求解器选择面板，选择 PGMA，单击 OK 按钮，则激活预条件广义极小残差求解器，并弹出图 4-4 所示共轭梯度求解器控制参数面板。该求解器面板包括六个控制参数，其中四个参数与共轭残差求解器中的一样。此外还有 FILL 和 MODP 参数。FILL 参数表示 L 和 U 分解矩阵时每一行允许额外单元的数量。一个额外单元被定义为除了原始矩阵的行中非零单元的数量。FILL 的取值范围从 0～10，默认值为 6；MODP 参数代表使用 TDMA 执行总体迭代的次数，如果达到了设置的迭代次数计算问题还没有收敛，则采用 PGMR 算法继续计算。但是第一次总体迭代总是使用 PGMR 方法，默认值为 0，即总采用 PGMR 算法。通常使用 MODP 参数即可以满足温度方程对求解精度的要求，也可以节约计算时间。

PGMR 求解器控制参数设置面板，对于求解不同自由度方程略有不同。求解动量方程和压力方程时，没有 MODP 求解控制参数；求解湍流动能和湍流动能耗散率方程时没有 MODP 和 DELT 参数。

Semi Direct Solver Options for Energy

[FLDATA22],MAXI,TEMP
Number of conj dir iterations　1000

[FLDATA20],SRCH,TEMP
Number of search vectors used　12

[FLDATA20A],PGMR,FILL
Only used for PRES and TEMP　6

[FLDATA20A],PGMR,MODP
Only used for TEMP　0

[FLDATA21],CONV,TEMP
Convergence criterion　1e-012

[FLDATA23],DELT,TEMP
Minimum delta　1e-010

图 4-4　预条件广义极小残差求解器控制参数设置面板

当构造 L 和 U 分解矩阵时，PGMR 方法使用完全填充。PGMR 方法使用 LU 预条件将系统方程转换成一系列较易求解的方程。对于预条件共轭残差法方程。系数矩阵被分解成近似的 LU 矩阵。在预条件共轭残差方法中，初始矩阵的稀疏模式被保留在 L 和 U 矩阵中。

因此，当用户使用 PGMR 方法求解压力或温度方程时必须指定填充数量 FILL，此外用户必须指定搜索矢量 SRCH。

对于不同的问题 SRCH 的取值范围较大。如果用户设置了较大的 SRCH 值，则会导致计算过程的存储要求超过计算机所能提供的存储空间，造成终止计算。如果遇到这种情况，则建议用户使用惯性松弛。建议用户不使用该求解器来求解速度。

对于非 FLOTRAN 分析被相关联的求解输出记录在 Jobname.out 文件中。FLOTRAN 的迭代求解器的输出被记录在 jobname.dbg 文件中。事实上，Jobname.dbg 记录了 PGMR 求解

器的使用情况。如果达到了收敛，达到了最大迭代次数但没有收敛或求解终止，都会显示出该文件。

对于下列问题 PGMR 方法会失效：



- 求解的代数方程组为病态问题。
- 问题的代数方程组不合适。
- 指定的收敛容差因子太小。
- 指定的迭代次数过少。

如果 PGMR 算法停止计算，原因可能是求解问题为病态或形成的代数方程组不合适。如果求解问题是病态的，则建议用户调节控制参数来改进求解问题。用户可以输入较大的 FILL 或 SRCH 值。用户也可以使用惯性松弛。如果是形成的代数方程组不合适，原因可能是输入的流体属性参数错误或施加的边界条件不恰当。用户需要重新检查输入参数和施加的边界条件以确保其准确性。FLOTRAN 不允许用户设置的收敛容差因子比程序的默认值大，如果用户输入了一个比默认收敛容差因子大的值，则程序会弹出一个 i 警告，并且在计算时会自动采用默认值。如果达到了最大迭代次数，但问题还没有收敛则建议用户增加迭代次数。

如果用户对于 PGMR 求解器计算得出的结果有疑问，可以将收敛容差因子设置一个更小的值再重新计算一遍然后进行对比。

4.6 稀疏矩阵直接求解法

用户如果选择 Sparse Direct，单击 OK 按钮，则激活了稀疏矩阵直接求解法。稀疏矩阵直接求解法非常占用内存，建议用户只有在其他求解算法无效时才使用该算法。稀疏矩阵直接求解法会在分解矩阵时产生中间文件并且很难去预测所需内存的大小。使用该方法时，用户要确保有足够的硬盘空间来存储中间文件。对于求解速度，如果用户选择稀疏矩阵直接求解法，则求解时程序会自动将其转换为预条件共轭梯度求解算法。稀疏矩阵直接求解器不适合求解速度。

4.7 预条件 BiCGStab 求解器

用户可用下列方式选择预条件共轭残差求解器：

GUI：Main Menu｜ Solution｜FLOTRAN Set Up｜CFD Solver Controls｜DOF，弹出求解器选择面板，选择 PBCGM，单击 OK 按钮，则激活预条件 BiCGStab 求解器，并弹出图 4-5 所示的预条件 BiCGStab 求解器控制参数设置面板。该面板包括四个控制参数，含义在前面已经详细讲解过，这里不再阐述。

PBCGM 为广义双共轭梯度算法，该算法使用两组矢量构建系数矩阵和真实传递矩阵。该两组矢量彼此正交。与 PGMR 相似，PBCGM 算法也使用 FILL 参数，用来构件 L 和 U 分解矩阵。通过该种技术将系统方程转换为一系列的较易求解的矩阵。

因此，当用户使用 PBCGM 求解器时，用户需要指定 FILL 参数，同时用户必须指定搜索矢量参数 SRCH。

Semi Direct Solver Options for ENDS
[FLDATA22],MAXI,ENDS
No. of conj dir iterations 100
[FLDATA20],SRCH,ENDS
No. of search vectors used 2
[FLDATA20B],PBCG,FILL
Used for all 6
[FLDATA21],CONV,ENDS
Convergence criteria 1e-005
OK Cancel Help

图 4-5　预条件 BiCGStab 求解器控制参数设置面板

在 FLOTRAN 中，有两种 PBCGM 算法可用。这两种算法的差别在于 FILL 的取值。当 FILL=0 时，处理 LU 预处理外，采用平行算法。当 FIL 不等于 0 时，不采用平行算法。

对于求解器的选择，核心是首先用户想得到什么样的解，用户可能只想快速地得到近似解，也可能想精确地求解方程。对有些问题，能量方程的求解是非常困难的，对所有问题，都想得到基于收敛的能量方程的正确解。TDMA（三对角矩阵法）求解器（默认）在同时求解流动和能量方程且流体特性是温度的函数时是很有用的。对于由密度变化驱动的自然对流，TDMA 尤其有用，此时无需设置收敛判据，只要简单地给定扫掠数（迭代次数），当然，解是近似的。TDMA 法与 Jacobi 系数密切相关，它每次都会修改前次迭代的解。有时求解器会发生滞止，但很少发散，当求解器已无法改变前次迭代的解时，发生滞止。其他求解器都能精确求解。半直接的共轭残差法（CR）和预条件共轭残差法（PCCR）非常鲁棒。其中 PCCR 法由于有预条件步，求解更鲁棒。这些求解器采用的算法通过把解表达成相互关联的搜索矢量的线性组合来改进求解。在每个内部迭代过程中，对每一个新的搜索矢量计算一个算子并应用到该搜索矢量以使方程的残差更小。和 TDMA 算法一样，这些算法每次都会修改前次迭代的解，如果用户增加搜索矢量的个数，将会得到更好的收敛情况。必须设置收敛判据（一般），求解器通过该因子来减小残差（RTR）。如果问题太困难，该方法会发生滞止，求解停止。如果滞止发生在一定迭代步后，则意味着已得到正确的解，解已不能再被改进。预条件广义极小残值法最小残差（PGMR）求解器内部用了一种不同的技术来求解。根据以前的使用经验，收敛判据必须设置严格（默认值，但有时需要或更小）。用户可以设置不完全 Choleski 因子（预条件中使用）和搜索矢量个数，但实际使用过程中这些参数很少改变。该方法的一个显著特点是每一次尝试的初始值都设置为零。如果收敛判据设置太宽松，结果将完全不正确。所以，如果所得计算结果明显有偏差，可通过提高收敛判据数量级来得到更好的结果。

第 5 章　FLOTRAN 收敛技术



5.1　收敛

自然界的流体问题是非线性的并且有时难以保证其收敛。有些问题还具有瞬态性质，致使稳态算法难以产生满意的计算结果。不稳定的求解原因：需要求解的矩阵条件数太差。可能由以下原因导致条件数差：有限元单元的网格在求解问题域中存在大梯度。在自然界中，观察到的流体现象可能是不稳定的。

通过收敛监测参数来确定非耦合求解器是否总体收敛。在每一次总体迭代中为每一个自由度计算收敛检测系数。自由度的收敛检查量主要衡量从一个总体迭代到下一个总体迭代中自由度的变化率并进行归一化，表达式如下

$$M_{\phi}=\frac{\sum_{i=1}^{N}\left|\phi_i^k-\phi_i^{k-1}\right|}{\sum_{i=1}^{N}\left|\phi_i^k\right|} \tag{5-1}$$

式中，M_{ϕ}为自由度的收敛监测量；N 为有限单元节点的总数量；ϕ为自由度；k 为当前总体迭代数量。

由式（5-1）可知，自由度的收敛监测量等于每一个自由度变化率绝对值的和比上每一个自由度绝对值的和。

当收敛监测压力和温度达到很小的值时，用户可以选择终止计算。用户可以使用下列方式设置自由度的收敛容差：

命令：FLDATA3

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Execution Ctrl，弹出图 5-1 所示的自由度收敛容差设置面板。该面板中共包括七个自由度，分别是：VX、VY、VZ、PRES、TEMP、ENKE 和 ENDS。由图可知：对于速度，湍流动能和湍流动能耗散率默认的收敛容差为 1×10^{-2}，压力和温度的默认收敛默认容差为 1×10^{-8}。为了保证压力方程和能量方程的守恒性，建议用户不用施加比默认设置收敛容差还大的数值。

5.2　稳定性

FLOTRAN 提供了三种方法减慢和稳定求解。这三种方法分别是松弛、惯性松弛和人工阻尼。

[FLDATA3],TERM Termination Criteria

VX Velocity component	0.01
VY Velocity component	0.01
VZ Velocity component	0.01
PRES Pressure	1e-008
TEMP Temperature	1e-008
ENKE Turbulent kinetic energy	0.01
ENDS Turbulent dissipation	0.01

Note: Termination check is ignored for a DOF if its termination criterion is negative

图 5-1 自由度收敛容差设置面板

5.2.1 松弛

松弛系数是一个其值介于 0～1 之间的小数，它表示旧结果与附加在旧结果上以形成新结果的最近一次计算量之间的变化量。除了自由度外，松弛可以应用于层流属性和通过湍流方程计算得到有效粘度与有效导热系数。使用 ϕ_i 表示感兴趣的节点值，则松弛的表达式如下

$$\phi_i^{\text{new}} = \left(1 - r^{\phi}\right)\phi_i^{\text{old}} + r^{\phi}\phi_i^{\text{calc}} \tag{5-2}$$

式中，r^{ϕ} 为变量的松弛系数。

用户可用下列方法设置自由度的松弛系数：

命令：FLDATA25,RELX

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Relax/Stab/Cap | DOF Relaxation，弹出图 5-2 所示的自由度松弛系数设置面板，由图可知速度、压力和湍流动能的松弛系数默认值为 0.5，温度的松弛系数默认值为 0.8。

DOF Relaxation

[FLDATA25],RELX

VX VX relaxation	0.5
VY VY relaxation	0.5
VZ VZ relaxation	0.5
PRES Pressure relaxation	0.5
TEMP Temperature relaxation	0.8
ENKE Turb kinetic energy relax	0.5

图 5-2 自由度松弛系数设置面板

用户可用下列方法设置流体属性的松弛系数：

命令：FLDATA25,RELX

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Relax/Stab/Cap | Prop Relaxation，弹出图 5-3 所示的流体属性松弛系数设置面板，由图可知：密度、粘度、导热系数和有效粘度的默认值为 0.5，比热容的默认值为 1。



图 5-3 流体属性松弛系数设置面板

5.2.2 惯性松弛

对某个自由度的方程组的惯性松弛就是使其矩阵的主对角占优以保持求解的稳定性。这与瞬态求解相似。如果一个解在收敛过程中没有发生舍入误差，则惯性松弛的值不会影响到求解的最终结果。但是通常的求解过程都会发生舍入误差，故惯性松弛可能对结果产生影响。惯性松弛技术常用于求解可压缩流体的压力方程和湍流方程。该项技术应用于自由度的求解。

求解的系统代数方程可用下式表示，其中 i 的取值范围从 1 到模型的节点总数，即

$$a_{ii}\phi_i + \sum_{j\neq i} a_{ij}\phi_j = f_i \tag{5-3}$$

使用惯性松弛后，系统方程变为

$$\left(a_{ii} + A_{ii}^d\right)\phi_i + \sum_{j\neq i} a_{ij}\phi_j = f_i + A_{ii}^d \phi_i^{\text{old}} \tag{5-4}$$

式中，$A_{ii}^d = \dfrac{\int \rho W \mathrm{d}(vol)}{B^{\text{rf}}}$（$B^{\text{rf}}$ 为惯性松弛因子）。

计算收敛时，$\phi_i^{\text{old}} = \phi_i$。所以相同的值将被添加到方程的两侧。惯性松弛有助于使解稳定下来。对于压力，所用的 A_{ii}^d 值一般介于 1×10^{-6}（超松弛）和 1×10^{-3}（亚松弛）之间。较小的值提高了更大的对角线优势，这样方程就稳定了。但是这样做的代价是收敛速度较慢，因为并没有太强调方程中存在交叉耦合项的影响。如果问题是收敛的，则惯性松弛对解并没有影响，可以通过观察 Jobname.dbg 文件中参数 RTR 的性能来评估松弛的影响。

5.2.3 人工粘度

人工粘性用于在梯度较大的区域平抑速度解。它有助于可压缩问题的收敛，也有助于对有分布阻力的不可压缩问题的速度解进行平抑。对于不可压缩问题，应使人工粘性的幅值与有效粘性的幅值处于相同的数量级。施加人工粘度后，会出现附加项

$$R_x = \mu_a \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) \tag{5-5}$$

$$R_y = \mu_a \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) \tag{5-6}$$

$$R_z = \mu_a \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) \tag{5-7}$$

式中，μ_a 为人工粘度。

在动量方程中，离散感兴趣方向的速度导数时，该项会被添加到系数矩阵的主对角线上。因为附加项等于人工粘度乘以速度的散度，对于不可压缩流体，速度的散度等于 0，因此它会影响最终的求解。对于不可压缩流体，速度的散度不为 0，并且人工粘度必须只能作为一个临时收敛工具，在最后求解时将被移除。

用户可以使用下列方式设置惯性粘度和人工粘度：

命令：FLDATA26，STAB

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Relax/Stab/Cap | Stability Parms，弹出图 5-4 所示的惯性松弛系数和人工粘度设置面板，由图可知：动量方程、压力方程、能量方程和湍流方程的惯性松弛系数为 1×10^{15}，该值取得越大，则系统方程越松弛。人工粘度的默认值为 0。

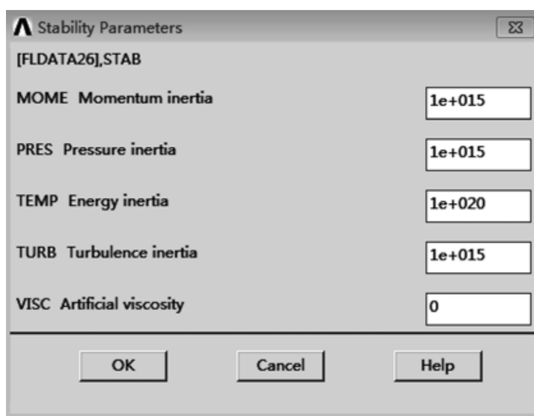


图 5-4　惯性松弛系数和人工粘度设置面板

5.3　残差文件

基于计算域中节点幅值残差评估求解收敛性的好与坏。基于旧的求解和新的系数矩阵与

强迫函数计算残差。对于每一个自由度都可以计算残差（VX、VY、VZ、PRES、TEMP、ENKE、ENDS）。

用ϕ表示自由度，对于残差矢量 r 的矩阵方程可以写成

$$\left[A_{\phi}^{n}\right]\left\{\phi^{n1}\right\}\left\{b_{\phi}^{n}\right\}=\left\{r_{\phi}\right\} \tag{5-8}$$

其中上角标表示总体迭代次数，下角标与矩阵和每一个自由度ϕ的强迫函数相关联。残差提供了关于求解可能是震荡性的信息。使用系数矩阵中的每一个节点对应的主角项对每一个节点的计算结果进行归一化。残差文件中的信息可以对每一个自由度的节点值与其残差值进行直接比较。

用户可使用下列方式控制是否输出残差文件：

命令：FLDATA5,OUTP

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Additional Out | Residual File，弹出图 5-5 所示的输出残差文件设置面板，程序默认是不输出残差文件的。如果用户想要输出残差文件，则勾选 Output residual file 项，单击 OK。

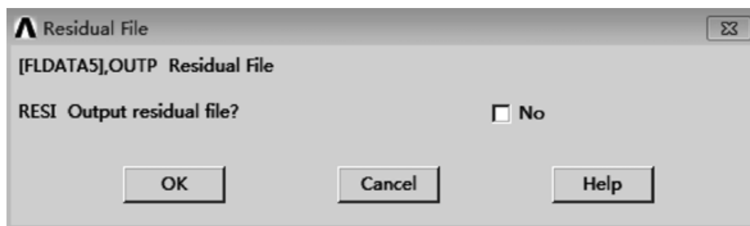


图 5-5　输出残差文件设置面板

5.4　修正惯性松弛

与惯性松弛技术相似，修正惯性松弛技术也是用来使得系统方程中的对角项占主导。该项技术用来与 SUPG 方法联合使用以增强求解的稳定性。使用修正惯性松弛的系数方程与式（5-4）的形式相同，但定义的附近对角项不同

$$A_{ii}^{d}=B^{MIR}\int\left(\frac{\rho u}{h}+\frac{\Gamma}{h^{2}}\right)\mathrm{d}(vol) \tag{5-9}$$

式中，ρ 为密度（density）；Γ 为广义扩散系数；u 为局部速度；h 为局部长度；B_{MIR} 为修正惯性松弛系数。

用户可用下列方式设置修正惯性松弛：

命令：FLDATA34, MIR

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Relax/Stab/Cap | MIR Stabilization，弹出图 5-6 所示的修正惯性松弛系数设置面板。

由图可知，修正惯性松弛系数只应用于动量方程、能量方程和湍流方程。并且默认值都为 0。修正惯性松弛系数只能为正值，并且建议用户的设置范围为 0～1，较大的值可提供更多刚性，但是它可能产生更慢的收敛速度。



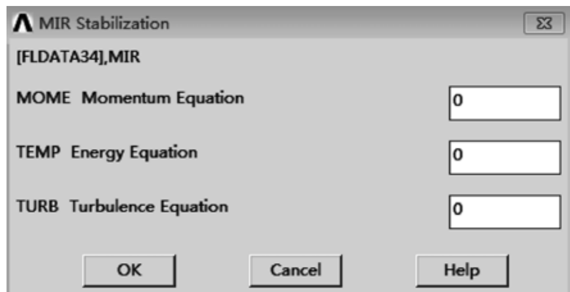


图 5-6　修正惯性松弛系数设置面板

5.5　自由度限值

自由度限值使所求解量不能超出用户所定义的值，可对速度、压力和温度自由度进行限制（VX、VY、VZ、PRES、TEMP）。速度限值可消除速度尖峰的不利影响，这种速度尖峰通常发生在收敛过程中的较早阶段。它还特别适合用于可压缩流分析，因这类分析中速度尖峰通常使动能项大到产生负的静温。当用户激活自由度限值时，ANSYS 会和收敛检测器一起弹出提示信息。当对压力进行限值时，所限的值是由压力方程解算出来的压力而不是松弛后的压力，故当限值后重启动时，压力值仍有可能超出限值。

限值中压力值为相对压力，温度为绝对温度。当执行可压缩热流分析时，用户应该限制总温度的值。

注意：当有速度限值时，质量有可能不守恒。

用户可用下列方式设置自由度限值：

命令：FLDATA31,CAPP

菜单：Main Menu | Solution | FLOTRAN SetUp | Relax/Stab/Cap | Results Capping，弹出图 5-7 所示的自由度限值设置面板（一），程序默认不对任何自由度限值。如果用户选择每一种自由度中的 Yes 选项，单击 OK，则会弹出图 5-8 所示的自由度限值设置面板（二）。

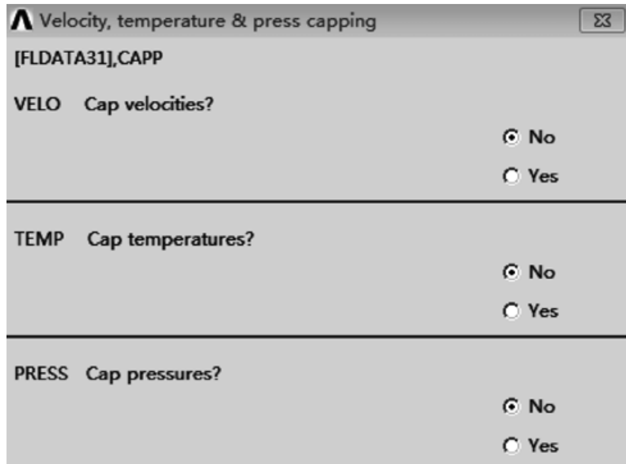


图 5-7　自由度限值设置面板（一）

Set capping values

[FLDATA31],CAPP

UMIN	Minimum VX cap	-1e+020
UMAX	Maximum VX cap	1e+020
VMIN	Minimum VY cap	-1e+020
VMAX	Maximum VY cap	1e+020
WMIN	Minimum VZ cap	-1e+020
WMAX	Maximum VZ cap	1e+020
TMIN	Minimum TEMP cap	-1e+020
TMAX	Maximum TEMP cap	1e+020
PMIN	Minimum PRESS cap	-1e+020
PMAX	Maximum PRESS cap	1e+020

图 5-8　自由度限值设置面板（二）

对于速度、温度和压力的默认自由度限值是最小值，为-1×10^{20}，最大值为 1×10^{20}，用户可以根据需要进行修改。

第 6 章　流体属性及环境参数

通过前面的讲解可以知道，求解流体流动问题，除了需要设置流体流动状态，即层流还是湍流，是否考虑温度外，还需要设置流体属性参数，流线基本属性参数包括流体的密度、粘度、导热系数和比热，此外流体属性参数还包括表面张力系数，壁面静态接触角和多组分传送。FLOTRAN 为流体基本属性参数提供多种定义方法能够满足工程设计与计算的需要。

6.1　密度

6.1.1 理论简介

1．常数

对于常数类型，密度的表达式为

$$\rho = \rho_{\mathrm{N}} \tag{6-1}$$

式中，ρ 为密度；ρ_{N} 为名义密度。

2．液体

对于液体类型，密度的表达式为

$$\rho = \rho_{\mathrm{N}} + C_2^{\rho}\left(T - C_1^{\rho}\right) + C_3^{\rho}\left(T - C_1^{\rho}\right)^2 \tag{6-2}$$

式中，T 为热力学温度；C_1^{ρ} 为第一密度系数，该数值对应于密度等于 ρ_{N} 时的绝对温度；C_2^{ρ} 为第二密度系数；C_3^{ρ} 为第三密度系数。

3．气体

对于气体类型流体，密度的表达式为

$$\rho = \rho_{\mathrm{N}} \frac{p}{C_2^{\rho}} \frac{C_1^{\rho}}{T} \tag{6-3}$$

式中，p 为绝对压力。

ANSYS 为气体流体提供了多种单位，AIR-SI 表明使用国际单位，即 m-kg-s；AIR-CM 表明使用厘米-克-秒单位，即 cm-g-s；AIR-MM 表明使用毫米-克-秒单位，即 mm-g-s。

4．表格

对于这种类型，用户可以将密度设置为温度的函数。

5．CGAS

该选项仅对流体密度可用。使用理想气体定律计算密度。如果用户指定了组分，则可以使用该选项。计算公式如下

$$\rho = \frac{p}{RT\sum_{i=1}^{N}\left(Y_i / M_i\right)} \tag{6-4}$$

式中，N 为用户定义的流体组分数；Y_i 为第 i 种组分的质量分数；M_i 为第 i 种组分的相对分子质量；R 为其他的摩尔常数；p 为绝对压力。

6．CMIX

该材料属性也针对多组分问题的。其计算公式如下

$$\rho = \sum_{i=1}^{N} Y_i \rho_i \tag{6-5}$$

式中，N 为用户定义的流体组分数；Y_i 为第 i 种组分的质量分数；ρ_i 为第 i 种组分密度。

CMIX 表示的是单个组分属性的平均质量分数。

6.1.2 选择方法

用户可以使用下列方法设置流体密度：

命令：FLDATA12

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Fluid Properties，弹出图 6-1 所示的流体密度设置面板。



图 6-1 流体密度设置面板

1．常数的设置方法

用户选择流体密封设置面板中的 Constant，单击 OK 按钮，弹出图 6-2 所示的常数密度输入面板，该面板只有一个输入选项 Constant value，该参数即为式（6-1）中的名义密度 ρ_{N}。

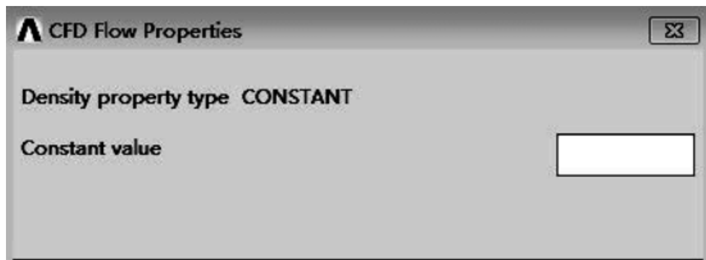


图 6-2 常数密度输入面板

2．液体的设置方法

用户选择流体密度设置面板中的 Liquid 项，单击 OK 按钮，弹出图 6-3 所示的液体密度输入面板，该面板存在四个输入参数 D0、D1、D2 和 D3。其中 D0 对应于式（6-2）中的 ρ_{N}，D1 对应于式（6-2）中的 C_1^{ρ}，D2 对应于式（6-2）中的 C_2^{ρ}，D3 对应于式（6-2）

中的 C_3^{ρ} 。

Density property type LIQUID

D0 Nominal value

D1 Temp. of nominal value 0

D2 Linear Coefficient 0

D3 Quadratic coeff 0

Density = D0 + D2 * (T-D1) + D3 * (T-D1)**2

图 6-3　液体密度输入面板

3．气体的设置方法

用户选择流体密封设置面板中的 Gas，单击 OK 按钮，弹出图 6-4 所示的气体密度输入面板，该面板存在三个输入参数 D0、D1 和 D2。其中 D0 对应于式（6-3）中的 ρ_N ，D1 对应于式（6-3）中的 C_1^{p} ，D2 对应于式（6-4）中的 C_2^{p} 。

Density property type GAS

D0 Nominal value

D1 Temp. of nominal value 0

D2 Corresponding pressure 0

Density = D0 * (P/D2) / (T/D1)

图 6-4　气体密度输入面板

4．表格的设置方法

通过该项功能可以实现模拟复杂流体属性的目的。主要包括以下三个步骤：

（1）定义表格

在该步骤用户可以将密度设置为关于温度的函数，包括离散的密度—温度数值点。用户也可以先定义函数然后将函数转换成表格。

（2）选择流体密度中的表格选项

用户选择流体密度设置面板中的 MP table。

（3）激活表格流体属性

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Table Props，弹出图 6-5 所示的流体表格属性设置面板（一），选择 Use tables for DENS？，弹出图 6-6 所示的流体表格属性选择面板（二），选择已经定义的密度表格，如 DENS，单击 OK 按钮。

以上将流体属性定义为表格形式的方法和步骤对于其他流体属性参数表格选项也适用，因此在后面对流体属性表格的定义设置不再阐述。

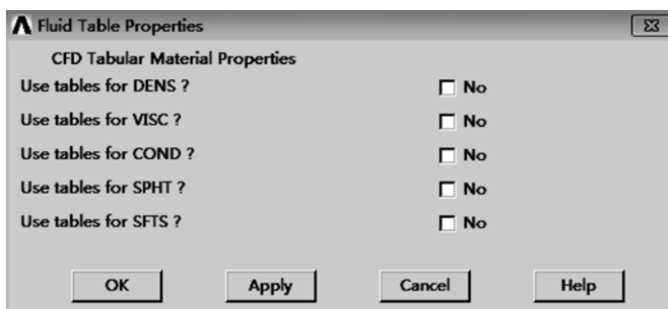


图 6-5　流体表格属性设置面板（一）

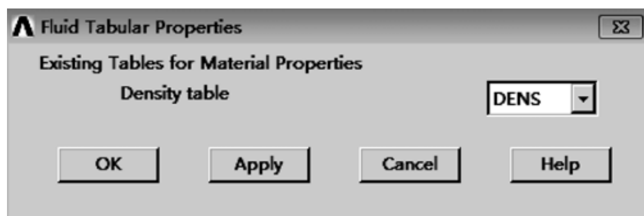


图 6-6　流体表格属性设置面板（二）

5．多组分密度的设置方法

FLOTRAN 为多组分流体的密度提供了两种计算方法，分别是 CGAS 和 CMIX，用户可以根据需要选择图 6-1 中流体密度设置面板上的 CGAS 和 CMIX 进行激活，程序会自动计算多组分流体的密度。

6.2　粘度

6.2.1　牛顿流体粘度理论

1．常数

对于常数类型，粘度的表达式为

$$\mu = \mu_N \tag{6-6}$$

式中，μ 为粘度；μ_N 为名义粘度。

2．液体

对于液体类型，粘度的表达式为

$$\mu = \mu_N e^A \tag{6-7}$$

其中
$$A = C_2^\mu\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{C_1^\mu}\right)+C_3^\mu\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{C_1^\mu}\right)^2 \tag{6-8}$$

式中，C_1^μ 为第一粘度系数；C_2^μ 为第二粘度系数；C_3^μ 为第三粘度系数。

3．气体

对于气体类型，粘度的表达式为

$$\mu = \mu_N \left(\frac{T}{C_1^\mu}\right)^{1.5} \left(\frac{C_1^\mu + C_2^\mu}{T + C_2^\mu}\right) \tag{6-9}$$

4．表格

对于这种类型，用户可以将粘度设置为温度的函数。

5．CMIX

对于该选项，粘度的表达式为

$$\mu = \sum_{i=1}^{N} Y_i \mu_i \tag{6-10}$$

式中，N 为用户的定义组分数；Y_i 为第 i 种组分的质量分数；μ_i 为第 i 种组分的粘度。

6.2.2 非牛顿流体粘度理论

1．幂指数（Power Law）

对于幂指数模型，粘度的表达式如下

$$\mu = \begin{cases} \mu_0 K D^{n-1} & D > D_0 \\ \mu_0 K D_0^{n-1} & D \leqslant D_0 \end{cases} \tag{6-11}$$

式中，μ_0 为名义粘度；K 为一致性指标；$D = \sqrt{I_2}$；D_0 为 D 的临界值；n 为幂率指数；I_2 为第二应变率张量不变量 $= \frac{1}{2}\sum_i \sum_j L_{ij} L_{ij}$，$L_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i})$；$v_{ij}$ 为在第 j 方向上的第 i 方向速度梯度。

这种关系被用于模拟的聚合物、血液、橡胶求解。K 的单位取决于 n 的值。

2．Carreau 模型

对于 Carreau 模型，粘度的表达式如下

$$\mu = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty)\left[1 + (\lambda D)^2\right]^{\frac{n-1}{2}} \tag{6-12}$$

其中：μ_∞——无限剪切率时的粘度；μ_0——剪切率为 0 时的粘度；λ——时间常数；n——幂指数。

通常情况下，流体的粘度行为就像一个幂律模型的剪切率对于中间值，而其余的有界零/无限剪切速率。

该模型移除了一些与幂率模型相关的不足。该流体的粘度被假定为具有下限和上限。

3．Bingham 模型

Bingham 模型：对于“ideal”Bingham 模型，粘度的表达式

$$\mu = \begin{cases} \mu_0 + G/D & \tau \geqslant G \\ \infty & \tau < G \end{cases} \tag{6-13}$$

式中，μ_0 为塑性粘度；G 为屈服强度；$\tau = \text{stress level} = \sqrt{\frac{1}{2}\sum_i \sum_j \tau_{ij}\tau_{ij}}$（$\tau_{ij}$ 为第 i 面第 j 方向上的额外压力）。

如图 6–7 所示，只要应力小于屈服应力，则流体行为为刚性。当应力超过了屈服强度，则增加的应力与应变率成比例，这种行为与牛顿流体相同。但这种模型进行数值计算是很困

难，因此实际使用是的模型为双线性 Bingham 模型。

$$\mu = \begin{cases} \mu_0 + G/D & D > \dfrac{G}{\mu_r - \mu_0} \\ \mu_r & D \leqslant \dfrac{G}{\mu_r - \mu_0} \end{cases} \tag{6-14}$$

式中，μ_r 为牛顿粘度。

图 6-8 所示为双线性 Bingham 模型中的应力—应变率关系。μ_r 至少要比 μ_0 大一个数量级。典型情况下，μ_r 一般的取值为 100 倍的 μ_0 以便模拟真实的 Bingham 流体行为。

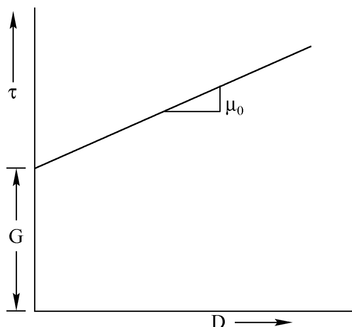


图 6-7 理想 Bingham 模型中的应力—应变率关系

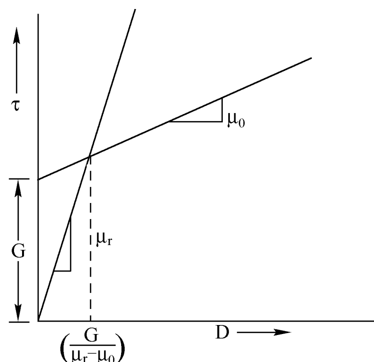


图 6-8 双线性 Bingham 模型中的应力—应变率惯性

6.2.3 选择方法

用户可以使用下列方法设置流体密度

命令：FLDATA12

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Fluid Properties，弹出图 6-9 所示的流体粘度设置面板。



图 6-9 流体粘度设置面板

1．常数的设置方法

用户选择流体粘度设置面板中的 Constant 项，单击 OK 按钮，弹出图 6-10 所示的常数密度设置面板，该面板只有一个输入选项 Constant value，该参数即为式（6-6）中的名义粘度 μ_N。

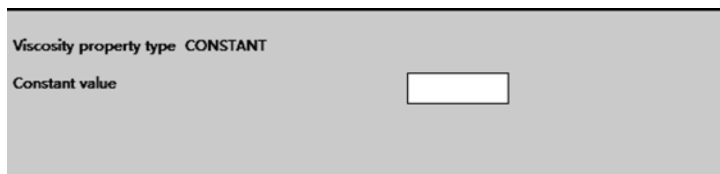


图 6-10 常数粘度设置面板

2．液体的设置方法

用户选择流体粘度设置面板中的 Liquid 项，单击 OK 按钮，弹出图 6−11 所示的液体粘度设置面板，该面板有四个输入参数，即 V0、V1、V2 和 V3，V0 对应于式（6−7）中的μ_N，V1 对应于式（6−8）中的C_1^μ，V2 对应于式（6−9）中的C_2^μ，V3 对应于式（6−5）中的C_3^μ。

Viscosity property type LIQUID
V0 Nominal value
V1 Temp. of nominal value 0
V2 Linear coefficient 0
V3 Quadratic coeff 0
Viscosity = V0 * EXP{V2*((1/T) - (1/V1)) + V3((1/T)-(1/V1))**2}

图 6−11 液体粘度设置面板

3．气体的设置方法

用户选择流体粘度设置面板中的 Gas，单击 OK 按钮，弹出图 6−12 所示的气体粘度设置面板，该面板有三个输入参数，即 V0、V1 和 V2，V0 对应于式（6−9）中的μ_N，V1 对应于式（6−9）中C_1^μ，V2 对应于式（6−9）中C_2^μ。

Viscosity property type GAS
V0 Nominal value
V1 Temp. of nominal value 0
V2 Linear coefficient 0
Viscosity = V0 * (T/V1)**1.5 * (V1+V2) / (T+V2)

图 6−12 气体粘度设置面板

4．幂率流体粘度模型设置方法

用户选择流体粘度设置面板中的 Power law 项，单击 OK 按钮，弹出图 6−13 所示的流体粘度设置面板，该面板有四个输入参数，即 V0、D0、K 和 n，V0 对应于式（6−11）中的μ_0，D0 对应于式（6−11）中的D_0，K 对应于式（6−11）中的K，n 对应于式（6−11）中的n。

Viscosity property type POWL
V0 Nominal viscosity
D0 Cutoff shear rate 0
K Consistency index 0
n Power 0
Viscosity = V0 * K * D**(n-1) , D > D0
Viscosity = V0 * K * D0**(n-1) , D <= D0
Initial Viscosity 0

图 6−13 幂率流体粘度设置面板

5．Carreau 流体粘度模型设置方法

用户选择流体粘度设置面板中的 Carreau 项，单击 OK 按钮，弹出图 6–14 所示的流 Carreau 体粘度模型设置面板，该面板有五个输入参数，即 V0、VI、K、n 和 Initial Viscosity，V0 对应于式（6–12）中的 μ_0，VI 对应于式（6–11）中的 μ_∞，K 对应于式（6–11）中的 λ，n 对应于式（6–11）中的 n；Initial Viscosity 用于计算 D。

Viscosity property type CARR
V0 Zero shear viscosity
VI Infinite shear viscosity 0
K Time constant 0
n Power 0
Viscosity = VI + (V0-VI)*(1+K*K*D*D) ** (n-1)/2
Initial Viscosity 0

图 6–14 Carreau 流体粘度设置面板

6．Bingham 流体粘度模型设置方法

用户选择流体粘度设置面板中的 Bingham 项，单击 OK 按钮，弹出图 6–15 所示的 Bingham 流体粘度模型设置面板，该面板有五个输入参数，即 V0、G、VF 和 Initial Viscosity，V0 对应于式（6–14）中的 μ_0，G 对应于式（6–14）中的 G，VF 对应于式（6–14）中的 μ_r；Initial Viscosity 用于计算 D。

Viscosity property type BING
V0 Plastic viscosity
G Yield/Plastic stress 0
VF Newtonian viscosity 0
Viscosity = V0 + G/D , D >= G/(VF - V0)
Viscosity = VF , D < G/(VF - V0)
Initial Viscosity 0

图 6–15 Bingham 流体粘度设置面板

7．多组分粘度的设置方法

FLOTRAN 为多组分流体的粘度提供了一种计算方法，即 CMIX，用户可以选择图 6–9 中流体粘度设置面板上的 CMIX 项进行激活，程序会自动计算多组分流体的粘度。

6.3 导热系数

6.3.1 理论简介

1．常数

对于常数类型，导热系数的表达式为

$$K = K_N \tag{6-15}$$

式中。K-导热系数；K_N-名义导热系数

2．液体

对于液体类型，导热系数的表达式为

$$K = K_N e^B \tag{6-16}$$

其中

$$B = C_2^K\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{C_1^K}\right)+C_3^K\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{C_1^K}\right)^2 \tag{6-17}$$

式中，C_1^K 为第一导热系数；C_2^K 为第二导热系数；式中，C_3^K 为第三导热系数。

3．气体

对于气体类型，导热系数的表达式为

$$K = K_N\left(\frac{T}{C_1^K}\right)^{1.5}\left(\frac{C_1^K + C_2^K}{T + C_2^K}\right) \tag{6-18}$$

4．表格

对于表格类型，用户可以将导热系数定义为关于温度的函数。

5．CMIX

如果用户选择该选项，则导热系数的表达式为

$$K = \sum_{i=1}^{N} Y_i K_i \tag{6-19}$$

式中，N 为用户定义的组分数；Y_i 为第 i 种组分的质量分数；K_i 为第 i 种组分的质量分数。

6.3.2 选择方法

用户可以使用下列方法设置流体密度

命令：FLDATA12

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Fluid Properties，弹出图 6-16 所示的流体导热系数设置面板。



图 6-16　流体导热系数设置面板

1．常数的设置方法

用户选择流体导热系数设置面板中的 Constant 项，单击 OK 按钮，弹出图 6-17 所示的流体导热系数输入面板，该面板只有一个输入选项 Constant value，该参数即为（6-15）中

的名义导热系数 K_N 。

Conductivity property type CONSTANT

Constant value

图 6-17　流体导热系数输入设置

2．液体的设置方法

用户选择流体导热系数设置面板中的 Liquid 项，单击 OK 按钮，弹出图 6-18 所示的液体导热系数设置面板，该面板包括三个输入参数：C0、C1 和 C2，C0 即为式（6-17）中的名义导热系数 K_N，C1 即为式（6-17）中的名义导热系数 C_1^K，C2 即为式（6-17）中的名义导热系数 C_2^K 。

Conductivity property type LIQUID

C0 Nominal value

C1 Temp. of nominal value 0

C2 Linear Coefficient 0

图 6-18　液体导热系数设置面板

3．气体的设置方法

用户选择流体导热系数设置面板中的 Gas 项，单击 OK 按钮，弹出图 6-19 所示的气体导热系数设置面板，该面板包括三个输入参数：C0、C1 和 C2，C0 即为式（6-18）中的名义导热系数 K_N，C1 即为式（6-18）中的名义导热系数 C_1^K，C2 即为式（6-18）中的名义导热系数 C_2^K 。

Conductivity property type GAS

C0 Nominal value

C1 Temp. of nominal value 0

C2 Linear Coefficient 0

Conductivity = C0 * (T/C1)**1.5 * (C1+C2) / (T+C2)

图 6-19　气体导热系数输入面板

4．多组分粘度的设置方法

FLOTRAN 为多组分流体的导热系数提供了一种计算方法，即 CMIX，用户可以选择图 6-16 中流体导热系数设置面板上的 CMIX 项进行激活，程序会自动计算多组分流体的导热系数。

6.4　比热容

6.4.1 理论简介

1．常数

对于常数类型，比热容的表达式为

$$C_{\mathrm{p}} = C_{\mathrm{pN}} \tag{6-20}$$

式中，C_{pN} 为名义比热容

2．表格

对于表格类型，用户指定的比热容可以设置为流体温度的函数。

3．CMIX

如果用户选择该选项，则导热系数的表达式：

$$K = \sum_{i=1}^{N} Y_i K_i \tag{6-21}$$

式中，N 为用户定义的组分数；Y_i 为第 i 种组分的质量分数；K_i 为第 i 种组分的质量。

6.4.2 选择方法

用户可以使用下列方法设置流体密度

命令：FLDATA12

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Fluid Properties，弹出图 6-20 所示的流体比热容设置面板。



图 6-20　流体比热容设置面板

1．常数的设置方法

用户选择流体比热容设置面板中的 Constant，单击 OK 按钮，弹出图 6-21 所示的流体导热系数输入面板，该面板只有一个输入选项 Constant value，该参数即为式（6-20）中的名义比热容 C_{pN}。

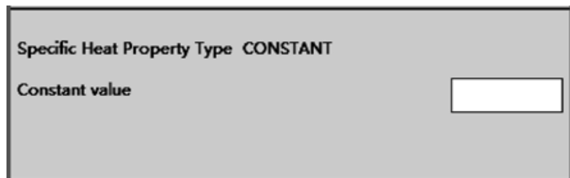


图 6-21　流体比热容设置面板

2．多组分比热容的设置方法

FLOTRAN 为多组分流体的比热容提供了一种计算方法，即 CMIX，用户可以选择图 6-20

中流体导热系数设置面板上的 CMIX 项进行激活，程序会自动计算多组分流体的比热容。

6.5 表面张力系数

6.5.1 理论简介

1．常数

对于常数类型，流体表面张力系数的表达式为

$$\sigma = \sigma_{\mathrm{N}} \tag{6-22}$$

式中，σ 为表面张力系数；σ_{N} 为名义表面张力系数。

2．液体

对于液体类型，表面张力的表达式为

$$\sigma = \sigma_{\mathrm{N}} + C_2^{\sigma}\left(T - C_1^{\sigma}\right) + C_3^{\sigma}\left(T - C_2^{\sigma}\right)^2 \tag{6-23}$$

式中，T 为绝对温度；C_1^{σ} 为第一表面张力系数；C_2^{σ} 为第二表面张力系数；C_3^{σ} 为第三表面张力系数。

3．表格

对于表格类型，用户可以将流体表面张力定义成温度的函数。

6.5.2 选择方法

对于表面张力系数，FLOTRAN 暂没有提供 GUI 操作，但可以使用下列命令流激活和设置。

1．常数的设置方法

用户可以输入下列命令流激活常数表面张力系数：

```
FLDATA8, NOMI, SFTS, Value
```

2．液体的设置方法

用户可以输入下列命令流激活液体的表面张力系数：

```
FLDATA8, NOMI, SFTS, Value
FLDATA9, COF1, SFTS, Value
FLDATA10, COF2, SFTS, Value
FLDATA11, COF3, SFTS, Value
```

6.6 壁面静态接触角

6.6.1 理论简介

壁面静态接触角 θ_{w} 描述了固体边界处得壁面附着力影响。它被定义为流体界面的切线与壁面切线之间的夹角。该角度不仅取决于流体属性材料参数，同时也取决于流体和壁面的局部条件。壁面静态接触角的计算表达式如下

$$\vec{n} = \vec{n}_{\rm w} \cos\theta_{\rm w} + \vec{n}_{\rm t} \sin\theta_{\rm w} \tag{6-24}$$

式中，$\vec{n}_{\rm w}$ 为指向壁面的单位壁面法向量；$\vec{n}_{\rm t}$ 为垂直于近壁面的单位矢量。

6.6.2 选择方法

用户可以使用下列命令流输入静态壁面接触角：

FLDATA8, NOMI, WSCA, Value

其中 Value 代表了静态壁面接触角，取值范围从 0～180°，程序默认值为 90°。

以上详细给用户介绍了流体属性参数的设置理论和设置方法，此外对于流体属性参数的设置，还存在一个是否允许流体属性惨变化的选项（Allow Value variations）。程序默认是不激活该选项。如果激活该选项，计算开始后，随着温度和压力的变化，总体迭代计算之间的流体属性会发生变化。建议用户当流体属性参数设置为常数时，则不需要激活该选项；如果流体属性参数是关于温度的表达式，则需要激活该选项。

6.7 设置流体计算环境

6.7.1 设置流体计算参考条件

用户可以使用下列方式设置参考条件

GUI：Main Menu｜Solution｜FLOTRAN Set Up｜Flow Environment｜Ref Conditions，弹出图 6-22 所示的流体计算参考条件设置面板，该面板包括 7 个参数：

Reference Conditions

[FLDATA15],PRES,REFE	
Reference pressure	101350
[FLDATA16],BULK,BETA	
Bulk modulus parameter	1e+015
[FLDATA17],GAMM,COMP	
Ratio of Cp/Cv	1.4
[FLDATA14],TEMP,NOMI	
Nominal temperature	293
[FLDATA14],TEMP,TTOT	
Stagnation (total) temp	293
[FLDATA14],TEMP,BULK	
Reference (bulk) temp	293
[TOFF] Temp offset from ABS zero	0

图 6-22　流体计算参考条件设置面板

（1）参考压力

Reference pressure 为参考压力，程序通过参考压力、相对压力以及流体密度和坐标系相关的值计算流体绝对压力，详细理论用户可以参考第 2 章中 1.6 压力一节。默认值为一个标准大气压（101350Pa）。

（2）体积模量

Bulk modulus 为体积模量参数。该参数主要用于计算瞬态不可压缩流体流动的计算。如果使用不可压缩算法（默认），则用户可以控制密度关于压力的导数值，即

$$\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}P}=\frac{1}{\beta} \tag{6-25}$$

体积模量的默认值为 1×10^{15}。

（3）比热容之比

Ratio of C_p/C_v 为比热容之比。其中 C_p 为定压比热容，表示单位质量的物质在压力不变的条件下，温度升高或下降 1℃或 1K 所吸收或放出的能量；C_v 为定容比热容，表示单位质量的物质在容积（体积）不变的条件下，温度升高或下降 1℃或 1K 吸收或放出的内能。该参数用力计算可压缩流体的流动问题，默认值为 1.4。

（4）名义温度

Nominal temperature 为名义温度。如果用户没有设置边界条件或瞬态初始条件，则该参数表示流体的初始温度，默认值为 293K。

（5）总（停滞）温度

Stagnation（total）temperature 为停滞（总）温度。该参数用于可压缩绝热流体流体问题的计算。可以流体的动能中计算静态温度，而流体的动能可以由速度的幅值、比热容和重力常数计算得到。即有

$$\mathrm{T}_{\mathrm{static}}=\mathrm{T}_{\mathrm{total}}-\frac{\mathrm{V}^2}{2\mathrm{g}_{\mathrm{c}}C_{\mathrm{p}}}$$

（6）参考温度

Reference（bulk）temp 为参考（体积）温度。如果指定了热通量或边界上的温度，则该参数被用来计算对流换热系数。参考温度即为流体外部环境温度默认值，为 293K。

（7）偏移温度

Temp offset from ABS zero 为到绝对零度的温度偏移值，对于摄氏温度单位该值为 273，程序默认采用卡尔文温度单位，因此该值的默认值为 0。

6.7.2 设置流体计算的转动坐标系

如果用户在转动坐标系中分析问题，可以在一个角速度不变的坐标系中计算或指定不同的速度，这种方法对于泵的叶片旋转产生的流场分析很有帮助，除了三维直角坐标系之外所有坐标系必须指定旋转轴为 Z 轴，对于平面轴对称坐标系，程序会自动指定 Z 轴为旋转轴。

用户可以使用下列方法设置转速和旋转轴的偏移量：

命令：CGOMGA/ CGLOC

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Flow Environment | Rotating Coords，弹出图 6-23 所示的流体计算转动坐标系设置面板，该面板主要包括两个控制选项：角速度

（Angular Velocity）和旋转轴的偏移（Location of Acceleration Coord System）

CGOMGX 表示绕 *X* 轴的旋转速度，CGOMGY 表示绕 *Y* 轴的旋转速度，CGOMGZ 表示绕 *Z* 轴的旋转速度，这三项的默认值都为 0；XLOC 表示旋转轴的 *X* 方向偏移距离，YLOC 表示旋转轴的 *Y* 方向偏移距离，ZLOC 表示旋转轴的 *Z* 方向偏移距离。

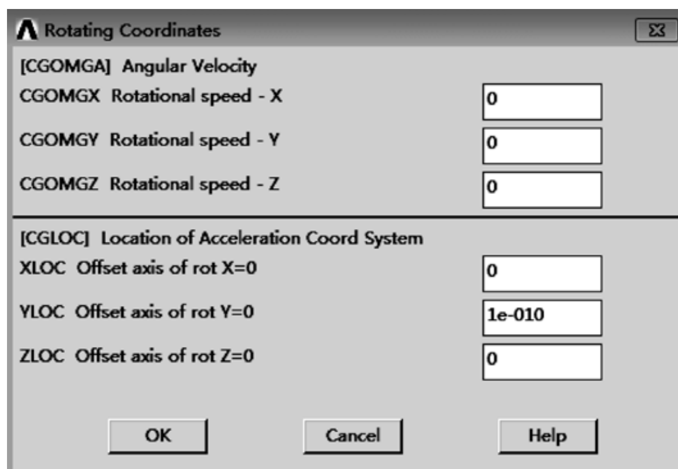


图 6−23　流体计算转动坐标系设置面板

6.7.3 设置流体计算重力

用户可以使用下列方法施加流体重力影响：

命令：ACEL

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Flow Environment | Gravity，弹出图 6−24 所示的流体重力设置面板，用户需要输入重力加速度，然后程序就可以考虑重力影响。ACELX 表示 *X* 方向的重力加速度，ACELY 表示 *Y* 方向的重力加速度，ACELZ 表示 *Z* 方向的重力加速度。

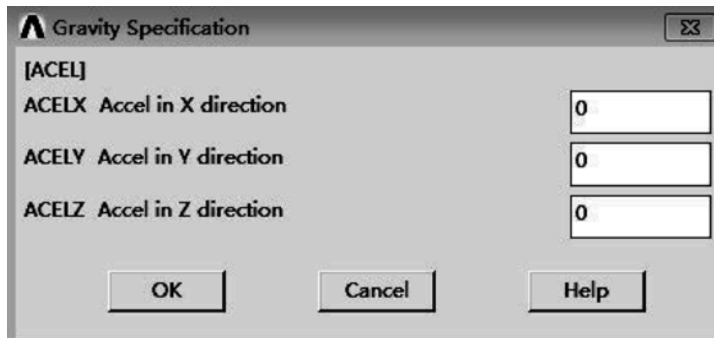


图 6−24　流体重力设置面板

第 7 章 流体求解导出量



7.1 马赫数

马赫数表示流体速度与流体中声速的比值。因为声速是流体状态方程的函数，因此马赫数由下式计算

$$M=\frac{|v|}{(\gamma RT)^{1/2}} \tag{7-1}$$

式中，M 为马赫数（以 MACH 符号输出）；γ 为比热容的比值；$|v|$ 为速度的幅值；R 为理想气体常数；T 为绝对温度。

7.2 总压力

根据用户设置的流体求解选项（Solution Options）是否具有可压缩性，ANSYS 分别提供了计算公式：

可压缩流体

$$p_{\text{tol}}=\left(p+p_{\text{ref}}\right)\left(1+\frac{\gamma-1}{2}M^{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}-p_{\text{ref}} \tag{7-2}$$

不可压缩流体

$$p_{\text{tot}}=p+\frac{1}{2}\rho|v|^{2} \tag{7-3}$$

式中，p_{tot} 为流体总压力；p 为相对压力；p_{ref} 为参考压力；ρ 为密度。

可压缩和不可压缩流体的流体压力系数计算公式相同，都为

$$p_{coef}=\frac{2\left(p-p_{f}\right)}{\rho_{f}v_{f}^{2}} \tag{7-4}$$

式中，P_{coef} 为压力系数；角标 f 为自由流线条件。

7.3 y⁺和壁面剪切应力

这些参量是湍流模型中壁面条件的一部分。首先，求解壁面剪切应力 τ_{w}

$$\frac{v_{\tan}}{\sqrt{\frac{\tau_{\text{w}}}{\rho}}}=\frac{1}{\kappa}\left(\frac{E\delta\rho}{\mu}\sqrt{\frac{\tau_{\text{w}}}{\rho}}\right) \tag{7-5}$$

式中，μ 为粘度；δ 为靠近壁面节点到壁的距离；v_{tan} 为靠近壁面节点平行于壁的速度；E 为湍流模型常数，默认值为 9；κ为湍流模型常数，默认值为 0.4；τ_w 为壁面剪切应力（以 TAUW 符号输出）。

现在，可以使用壁面剪切应力计算 y^+

$$y^+ = \delta \frac{\rho}{\mu}\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \tag{7-6}$$

式中，y^+为与壁面之间的无量纲距离参数。

7.4 流线函数

采用欧拉方法描述流体运动时，为反映流体在整个区域的流动方向，提出了流线的概念。流线是流场中某一时刻流体运动方向线，也即在流线上每一点的切线方向就是流体的运动方向。根据不同的坐标系，对于二维流线函数使用以下方式计算：

7.4.1 笛卡儿坐标系几何体

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} = -\rho v_y \tag{7-7}$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial y} = -\rho v_x \tag{7-8}$$

7.4.2 轴对称几何体（对称轴：X）

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} = y\rho v_y \tag{7-9}$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial y} = y\rho v_x \tag{7-10}$$

7.4.3 轴对称几何体（对称轴：Y）

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} = -x\rho v_y \tag{7-11}$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial y} = -x\rho v_x \tag{7-12}$$

7.4.4 极坐标系

$$\frac{\partial \Psi}{\partial r} = -\rho v_\theta \tag{7-13}$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \theta} = -r\rho v_r \tag{7-14}$$

式中，Ψ 为流线函数；x, y 为总体笛卡儿坐标；r 为径向坐标；θ 为轴向坐标；v_x，v_y 为总体笛卡儿坐标系中的速度分量；v_r，v_θ 为极坐标系中的速度分量。

v_x 和 v_y 等于 0 的点处的流线函数也为 0。

7.5 对流换热系数



7.5.1 计算节点热通量

为了计算壁面处的对流换热系数，首先要计算壁面处的节点热通量。程序通过节点生热率，间接求解节点热通量，节点生热率由下式给出

$$\{Q_n\} = -\left[K^t\right]\{T\} \tag{7-15}$$

式中，$\{Q_n\}$ 为节点生热率；$\left[K^t\right]$ 为整个模型的导热矩阵；$\{T\}$ 为节点温度矢量。

壁面上的每个节点热通量为

$$q_n = \frac{Q_n}{A_n} \tag{7-16}$$

式中，q_n 为节点热通量；Q_n 为矢量 $\{Q_n\}$ 的值；A_n 为与节点相关联的表面积。

7.5.2 计算热梯度

程序使用求解温度方程中的每一个节点处的温度和数值插值方法来计算垂直于壁面的热梯度

$$T = \sum_{a=1}^{L} N_a(\xi) T_a \tag{7-17}$$

式中，n 为表面法向。

7.5.3 计算对流系数

壁面上的每一个节点处的对流换热系数，由下式计算得到

$$h_n = \frac{q_n}{T_n - T_B} \tag{7-18}$$

式中，h_n 为节点对流换热系数；T_n 为节点温度；T_B 为自由流线或流体（环境）温度。

7.6 设置流体导出量

用户可使用下列方法设置流体计算导出量：

命令：FLDATA5

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Additional Out | RFL Out Derived，弹出图 7-1 所示的导出量输出设置面板，由图可知该面板包括 10 个导出输出选项：总压力（Output total pressure）、总温度（Output total temperature）、热通量（Output heat flux）、对流换热系数（Output film coefficients）、流线函数（Output stream functon）、压力系数（Output

pressure coeff）、马赫数（Output Mach number）、y^+（Output y plus）、壁面剪切应力（Output wall shear stress）和辐射通量（Output radiation flux），用户根据需要进行激活。

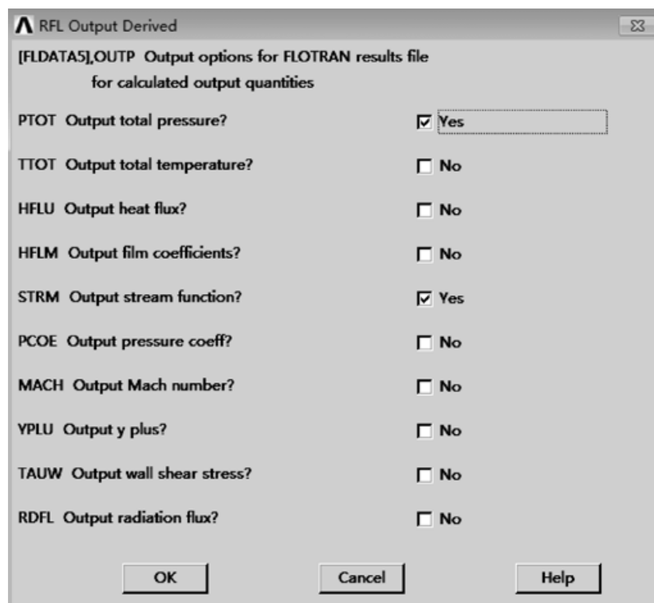


图 7-1　导出量输出设置面板

第 8 章　FLOTRAN 单元



8.1　单元简介

ANSYS 为 FLOTRAN 提供了二维单元 FLUID141 和三维单元 FLUID142。这两种流体单元可以用来模拟瞬态或稳态的流体分析，包括流体和非流体区域。在流体区域中可以求解粘性流与能量守恒方程，在非流体区域中只能求解能量方程。与那些用一维区域连接成网状模型的单元不同，使用 FLOTRAN CFD 单元可求解区域中的流动与温度分布。用户也可以用 FLOTRAN 中的二维或三维单元来进行流体—固体耦合分析。

对于 FLOTRAN CFD 单元，可通过动量守恒定律求得速度，通过质量守恒定律求得压力（如果需要计算温度，可从能量守恒定律求得）。使用分离序贯算法求解，即对控制方程进行有限元离散得出矩阵并对每一个自由度分别进行求解。流动问题是非线性的，控制方程是耦合在一起的。顺序求解所有的控制方程，连同更新任何与温度或压力相关的材料属性，构成一次总体迭代。要得到收敛的结果所需的总迭代步数可能差别相当大，这主要取决于问题的规模和稳定性。对于多达六种组分的质量组成需求解输运方程。

用户可在一个以恒定角速度旋转的坐标系中求解方程组。自由度为速度、压力和温度。如果需要激活湍流模型选项，需要计算两个湍流量：湍流动能与湍流动能耗散率。

8.2　输入数据

图 8-1 所示为 FLUID141 单元的几何结构图，图中给出了节点位置和单元坐标系。FLUID141 单元由 *I*、*J*、*K* 和 *L* 四个节点组成。当 *K* 和 *L* 节点重合时，FLUID141 单元变成三角形。图 8-2 给出了 FLUID142 单元的几何结构、节点位置及坐标系。FLUID142 单元由八个节点和材料特性定义。当节点 *M*、*N*、*O*、*P* 的序号为相同的值，且节点 *K*、*L* 的序号为相同的值时，FLUID142 为一个四面体单元。FLUID142 也可以为楔形和金字塔形，它们的几何结构如图 8-2 所示。根据 KEYOPT(3)的取值可以指定坐标系为笛卡儿坐标或圆柱坐标。

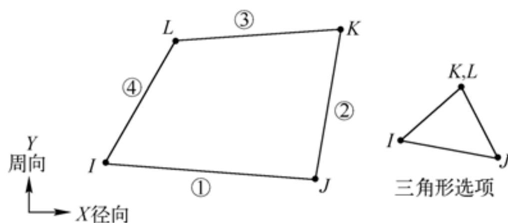


图 8-1　FLUID141 单元几何结构图



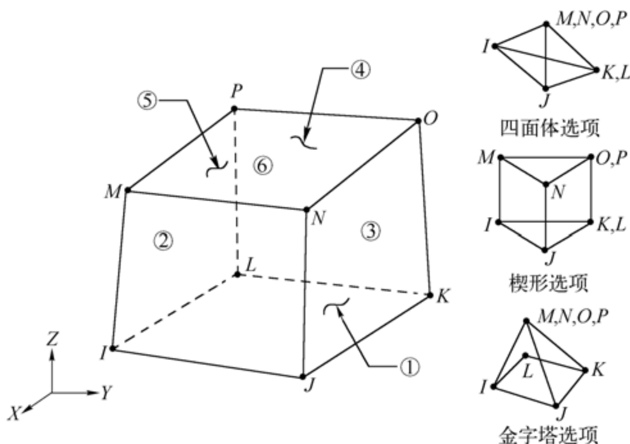


图 8-2 FLUID142 单元几何图

8.3 单元模型

8.3.1 分布式阻力

分布式阻力是用来近似多孔介质或其他不能建立准确几何模型的流体区域特性的一种便利途径。当用几何结构无法精确建模导致无法弥补损失时，可以人为施加分布式阻力。任何有分布式阻力的流体单元都必须有一个大于 1 的实常数。

分布式阻力对流体所产生的阻力值取决于这些因数中的一个或多个的联合作用：局部压头损失(K)，摩擦因数(f)或渗透性(C)。X 方向的总压力为

$$\left.\frac{\partial p}{\partial t}\right|_{\text{resis tan ce}} = \left\{ -K_p v_x |v| + \frac{f}{D_h} \rho v_x |v| + C_\mu v_x \right\} \tag{8-1}$$

式中，K 为局部压头损失；ρ 为密度；v_x 为 x 方向流速；$|v|$为流场速度的模；f 为由程序计算的摩擦系数；D_h 为流场的特征直径；μ为黏度；C 为渗透系数。

8.3.2 风扇模型

风扇模型（Fan model）的压力增量由压力梯度及实常数定义的流体长度决定。压力梯度可以看做是速度的二次的函数，下式为 X 方向的压力梯度

$$\left.\frac{\partial \rho}{\partial t}\right|_{\text{fan}} = C_1 + C_2 |v_x| + C_3 v_x^2 \tag{8-2}$$

式中，v 为流体速度；C_1、C_2、C_3 为由实常数指定的系数，对于任意方向的风扇模型（实常数 TYPE = 5），这 3 个系数为沿坐标系方向的分量。

8.3.3 非流体单元

如果单元材料号[MAT]大于 1，则它被认为是非流体单元。在非流体单元中只求解能量方程。用户可以定义多达 100 种不同的非流体材料。对于非流体单元用 MP 命令指定其密

度、比热容及热传导系数。对于随温度变化的材料参数，可以用MP或MPDATA输入。允许材料有各向异性的参数，空间变化相对于全局坐标系。

8.4　单元关键字



图 8-3 所示为 FLOTRAN 流体单元关键字设置面板，面板中包括了 K1、K3 和 K4 单元关键字。K1 关键字用来设置流体中的组分，默认设置为 0，即为单相流体，此外用户可以根据需要设置多达 6 种不同的流体组分。K3 关键字用来设置单元坐标系，默认设置为总体笛卡儿坐标系（Cartesian），也可以设置为关于 Y 对称的坐标系（Axisymm about Y）、关于 X 对称的坐标系（Axisymm about X）和极坐标系（Polar）。K4 关键字用来设置单元是否包括结构自由度，默认设置为不包括（No）和包括（Yes）。

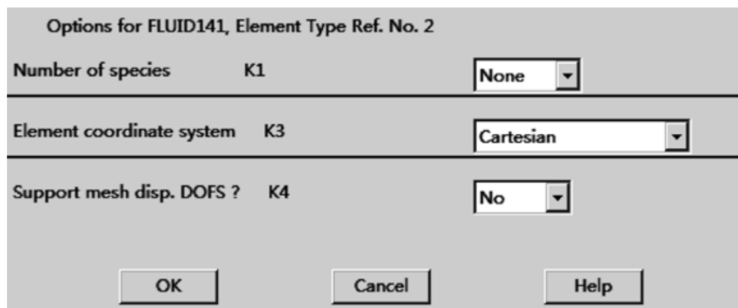


图 8-3　FLOTRAN 流体单元关键字设置面板

8.5　实常数

用户可以使用下列方式定义单元的实常数：

GUI：Main Menu | Preprocessor | Real Constants | Add/Edit/Delete，弹出定义实常数面板，单击 Add 按钮，然后选择二维或三维流体单元，单击 OK，则弹出图 8-4 所示的 FLOTRAN 流体单元实常数类型选择面板。该面板上包括三个选项：动网格和壁面粗糙度选项（ALE and Wall Roughness）、风扇或分布阻力模型（Fan or Resistance Model）和同时使用所有选项（All Options at Once）。

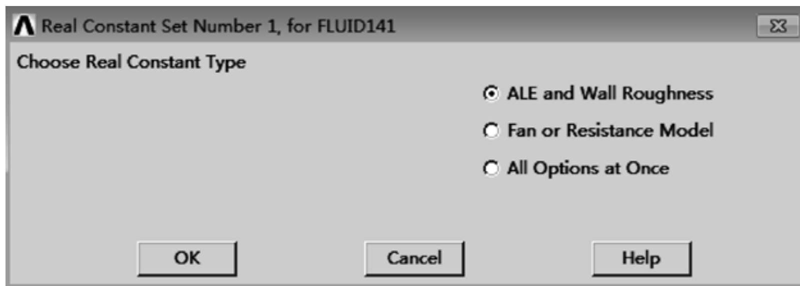


图 8-4　FLOTRAN 流体单元实常数类型选择面板

8.5.1 动网格和壁面粗糙度

下面给用户详细介绍每一种实常数类型选项。用户选择 ALE and Wall Roughness 并单击 OK，则弹出图 8-5 所示的动网格和壁面粗糙度实常数设置面板，该面板包括四个输出参数：单元生死容差（Element Birth/Death tolerance）、网格畸变乘子（Mesh morphing multiplier）、壁面粗糙度（Wall Roughness KS）和有效壁面粗糙度（Effective Wall Roughness CKS），其中前两项对应于动网格，后两项对应于壁面粗糙度。

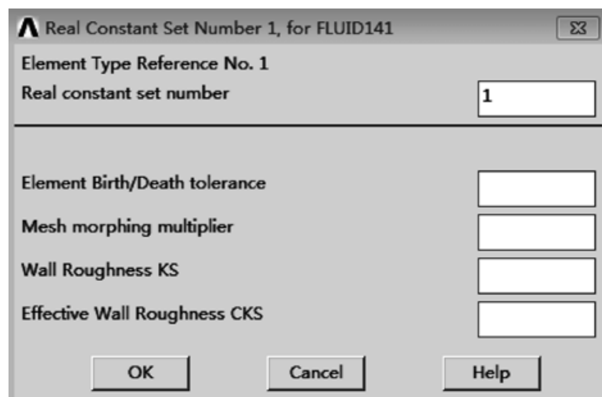


图 8-5　动网格和壁面粗糙度实常数设置面板

8.5.2 风扇和分布阻力模型

用户选择 Fan or Resistance Model，单击 OK，则弹出图 8-6 所示的风扇和分布阻力实常数设置面板，该面板包括五种选项：各项同性（Isotropic）、一个方向（One directional）、方向独立（Dir'n dependent）、类型 4 风扇模型（Type 4 fan model）和类型 5 风扇模型（Type 5 fan model）。

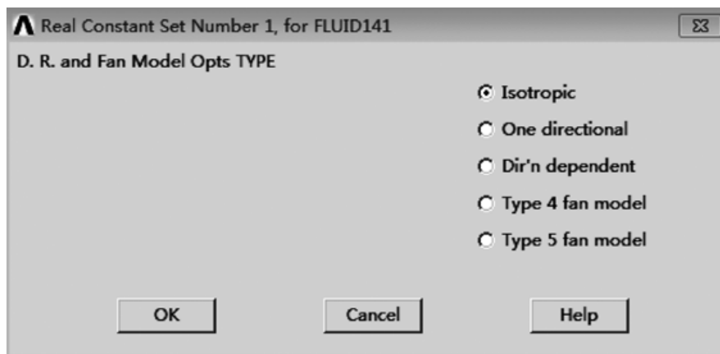


图 8-6　风扇和分布阻力实常数设置面板

1．各项同性模型

用户选择图 8-6 中的 Isotropic，则弹出图 8-7 所示的各项同性分布阻力参数设置面板，该面板包括压力损失 K（Head loss）、渗透率 C（Permeability）、水头直径 Dh（Hydraulic diameter）、

雷诺数系数 a（Coeff of Reynold's number）和雷诺数指数 b（Exponent of Reynold's no.）。

图 8-7　各项同性分布阻力参数设置面板

2．一个方向模型

用户选择图 8-6 中的 One directional，则弹出图 8-8 所示的一个方向上分布阻力参数设置面板，该面板除了包括图 8-7 中的五个参数外，还有一个设置方向选项（Flow direction），通过该选项用户可以选择分布阻力的方向。

图 8-8　一个方向上分布阻力参数设置面板

3．方向独立

用户选择图 8-6 中的 Dir'n dependent，则弹出图 8-9～图 8-11 所示的 *X*、*Y* 和 *Z* 方向上的分布阻力参数设置面板，对于二维流体单元 141，这个三个方向对应于 *X*、*Y* 方向和转动方向，对于三维流体单元 142，这三个方向对应于 *X*、*Y* 和 *Z* 方向，参数的含义与图 8-7 所示面板中的一样。

X-Direction Properties
Head loss (unit: 1/length) Kx
Permeability Cx
Hydraulic diameter Dhx
For Calculation of Friction Factor
Coeff of Reynold's number ax
Exponent of Reynold's no. bx

图 8-9　*X* 方向上的分布阻力参数设置面板

Y-Direction Properties
Head loss (unit: 1/length) Ky
Permeability Cy
Hydraulic diameter Dhy
For Calculation of Friction Factor
Coeff of Reynold's number ay
Exponent of Reynold's no. by

图 8-10　*Y* 方向上的分布阻力参数设置面板

Swirl-Direction Properties
Head loss (unit: 1/length) Kz
Permeability Cz
Hydraulic diameter Dhz
For Calculation of Friction Factor
Coeff of Reynold's number az
Exponent of Reynold's no. bz

图 8-11　*Z* 方向上的分布阻力参数设置面板

4．类型 4 风扇模型

用户选择图 8-6 中的 Type 4 fan model，则弹出图 8-12 所示的单方向风扇模型参数设置面板，由图可知，该面板包括四个选项：设置风扇方向（Fan direction），对于二维流体单元 141 可以设置两个方向，对于三维流体单元 142 可以设置三个方向；常数项（Constant term）、线性项（Linear term）和二次项（Quadratic term）。

Real Constant Set Number 1, for FLUID142, Type 4
Element Type Reference No. 2
Real constant set number 1
Fan direction DIR X
Constant term C1
Linear term C2
Quadratic term C3
OK Apply Cancel Help

图 8-12　单方向风扇模型参数设置面板

5．类型 5 风扇模型

用户选择图 8-6 中的 Type 5 fan model，则弹出图 8-13 所示的多方向风扇模型参数设置面板。使用该选项，用户可以独立设置各个方向上的风扇模型参数。

X-Direction Coefficients

Coefficient 1 for X	C1x	
Coefficient 2 for X	C2x	
Coefficient 3 for X	C3x	

Y-Direction Coefficients

Coefficient 1 for Y	C1y	
Coefficient 2 for Y	C2y	
Coefficient 3 for Y	C3y	

Z-Direction Coefficients

Coefficient 1 for Z	C1z	
Coefficient 2 fot Z	C2z	
Coefficient 3 for Z	C3z	

图 8-13　多方向风扇模型参数设置面板

8.5.3 同时使用所有选项

用户选择 All Options at Once，单击 OK，则也弹出与图 8-6 所示相同的设置面板。该面板包括五种选项：各项同性（Isotropic）、一个方向（One directional）、方向独立（Dir'n dependent）、类型 4 风扇模型（Type 4 fan model）和类型 5 风扇模型（Type 5 fan model）。对于每一种选项，程序会同时考虑动网格、壁面粗糙度及风扇和分布阻力模型，即把前面讲到的两类实常数放在一起设置，设置方法相同，参数含义也相同。

第 9 章　边 界 条 件

边界条件的选取正确与否直接影响到流体求解的正确性。对应 FLOTRAN 主要包括流场进口/出口边界、对称边界、壁面条件、周期边界、温度边界、热流、体积热源、传热系数和辐射，下面给用户进行详细讲解。

9.1　进口/出口边界

流场的进口/出口边界主要包括流速、压力和温度三类边界条件，下面给用户介绍设置方法。

9.1.1　设置流速

1．设置恒定流速

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Enty，弹出图 9-1 所示的在实体上施加流速设置面板，ANSYS 支持在模型的线（Lines）、面（Areas）和节点（Nodes）处施加恒定速度。

Apply VELO load on lines
[DL] Apply Velocity Constraints on lines
Apply VX load as a　Constant value
If Constant value then:
VX Load value
Apply VY load as a　Constant value
If Constant value then:
VY a Load value
Apply VZ load as a　Constant value
If Constant value then:
VZ Load value
Apply to endpoints?　☑ Yes
Moving wall?　☐ No
Generalized Symmetry?　☐ No

图 9-1　在实体上施加流速设置面板

施加恒定速度时，将速度载荷类型设置为常数值（Constant value）选项，然后在 VX、VY 和 VZ 相应的文本框中输入对应的速度即可。

2．设置与时间或位置相关的流速

（1）定义函数

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Functions | Define/Edit，弹出

图 9-2 所示的函数编辑器面板，通过该面板可以定义单变量函数（Single equation）和分段函数（Multivalued function based on regime variable），并将定义的函数进行保存。

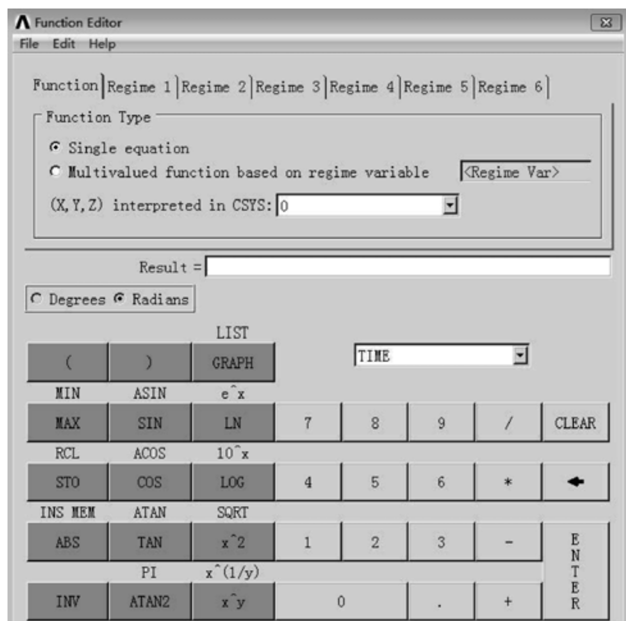


图 9-2 函数编辑器面板

（2）读入函数

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Functions | Read File，弹出打开文件对话框，选择已经定义好的函数，单击打开，弹出图 9-3 所示的函数加载器设置面板，在表格名（Table parameter name）文本框中输入表格的名称，单击 OK 按钮。

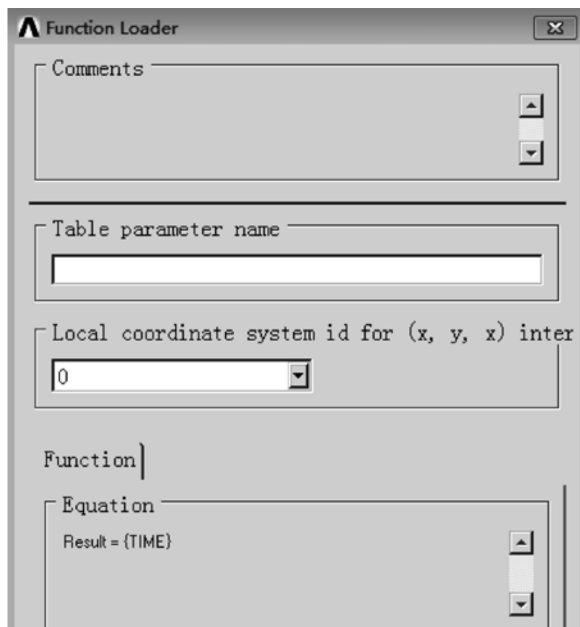


图 9-3 函数加载器设置面板

（3）定义速度

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Enty，弹出图 9-1 所示的在实体上施加速度设置面板，将速度载荷类型设置为存在的表格（Existing table）选项，单击 OK 按钮，弹出图 9-4 所示的施加表格速度设置面板，选择刚产生的表格名，单击 OK 按钮。

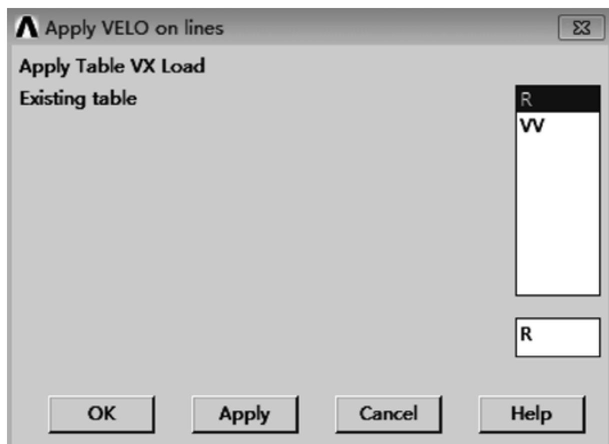


图 9-4　施加表格速度设置面板

9.1.2 设置压力

1．设置恒定压力

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Pressure DOF | On Enty，弹出图 9-5 所示的在实体上施加压力的设置面板，将施加压力载荷方式设置为 Constant value，然后输入施加的压力值。

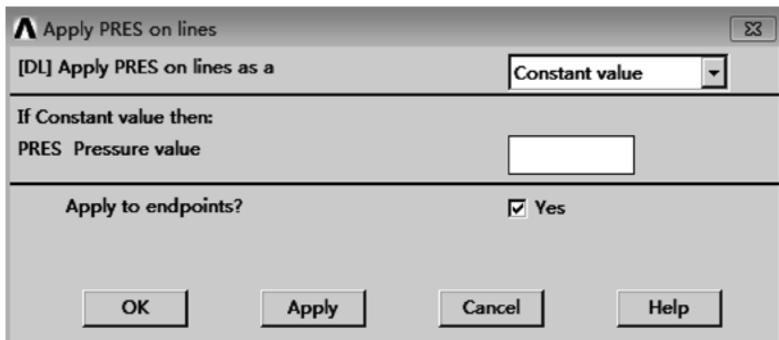


图 9-5　在实体上施加压力设置面板

2．设置变化压力

设置变化压力的方法与设置变化速度的方法一样，也是先定义函数，然后读入函数，最后按照设置恒定压力的方法，打开在实体上施加压力的设置面板，然后将压力载荷施加方式设置为存在的表格（Existing table）选项，单击 OK 按钮，选择相应的表格名，单击 OK 按

钮，完成加载。

9.1.3 设置温度

1．设置恒定温度

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Thermal | On Lines/Areas/Nodes，弹出图 9-6 所示的在实体处施加温度的设置面板，选择约束的自由度类型为温度（TEMP），约束方式为常数值（Constant value），在 VALUE 中输入施加的温度，单击 OK 按钮。

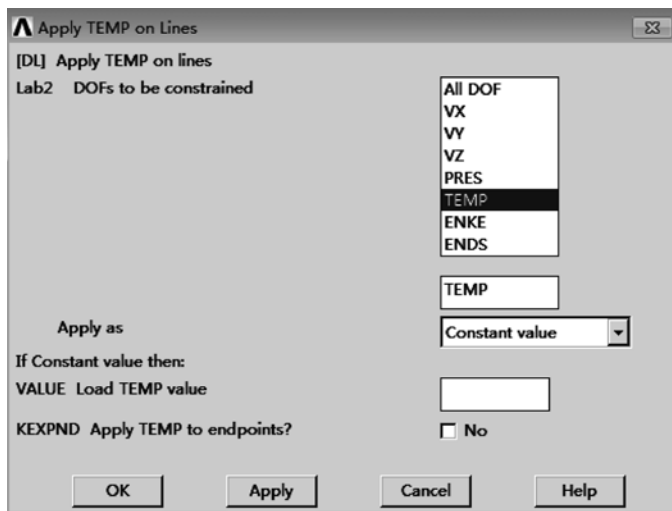


图 9-6 在实体处施加温度的设置面板

2．设置变化的温度

设置变化温度的方法与设置变化速度的方法一样，也是先定义函数，然后读入函数，最后按照设置恒定压力的方法，打开在实体上施加压力的设置面板，然后将压力载荷施加方式设置为存在的表格（Existing table），单击 OK 按钮，选择相应的表格名，单击 OK 按钮，完成加载。

9.2 壁面边界条件

9.2.1 固定壁面条件

固定壁面条件也称为无滑移条件，即将所有速度分量都设为 0。施加方法如下：

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Enty，弹出图 9-1 所示的在实体上施加速度设置面板，ANSYS 支持在模型的线（Lines）、面（Areas）和节点（Nodes）处施加恒定速度，将速度值设置为 0 即可。

9.2.2 移动壁面

指定速度分量与壁面相切，并将所有其他速度分量设为 0。作为一个表明为移动壁面的

标志，在移动壁面上将湍流动能设为-1，这种指定仅作为一个标志，并不影响壁面湍流模型的性能，施加方法如下：

GUI：Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Fluid/CFD｜Velocity｜On Enty，弹出图 9-1 所示的在实体上施加速度设置面板，ANSYS 支持在模型的线（Lines）、面（Areas）和节点（Nodes）处施加恒定速度，勾选面板上的 Moving Wall 选项，即可激活移动壁面。

9.2.3 壁面粗糙度

FLOTRAN 默认条件为光滑壁面。为了指定壁面粗糙度的值，必须使用平衡壁面湍流模型。使用 FLDATA24,TURB,WALL,EQLB 命令激活它。

为了在壁面的单位长度上施加均匀壁面粗糙度，用户可以使用 FLDATA24,TURB,KS,Value 命令。除了是实际壁面粗糙度外，KS 参数还确定了壁面粗糙度的形式（光滑的、过渡的或完全粗糙的）。默认值 0.0 表明壁面为完全光滑。

也可以施加一个位于 0.5～1.0 之间的经验无量纲系数（CKS），它确定了表面的不均匀度。默认值 0.5 表明用 KS 表示的壁面粗糙度是不均匀的。较高的值增加了壁面粗糙度损失，而没有改变由 KS 的值所隐含的流动形式。可以使用 FLDATA24,TURB,CKS,Value 命令来确定这个系数。如果有需要不同壁面粗糙度值的表面，则接下来的两种方法是可以利用的：

第一种方法对于所有壁面单元利用了实常数。将合适的 KS 和 CKS 值作为实常数施加到壁面附近的单元。对于每一组壁面粗糙度都存在一个不同的实常数。需要注意的是，施加到没有接近壁面的单元上的壁面粗糙度常数可以忽略不计，而由 FLDATA24,TURB 命令确定的任意 KS 和 CKS 值也可以忽略不计。

第二种方法适用于大多数壁面上具有相同粗糙条件的情况。首先，通过 FLDATA24,TURB 命令设置适用于大多数表面的值。值得注意的是，如果所有表面上施加相同的 CKS 值（这是典型的），可以通过 FLDATA24,TURB 命令来控制，并且实常数可以忽略不计。

9.3 对称边界条件

对称边界：垂直于边界的速度分量为零，而其他自由度没有被确定。

广义对称边界：用户也可以施加广义对称边界条件。如果 ALE 公式没有激活，就将速度分量设为与对称面相切；如果激活了 ALE 公式，就将其设为等于网格速度。可以使用下列方法施加广义对称边界条件：

```
D,NODE,ENDS,-1
DL,LINE,AREA,ENDS,-1,Value2
DA,AREA,ENDS,-1,Value2
```

有一种例外，如果在相同的边界处确定了任意一个速度分量，就会覆盖广义对称边界条件。在三维旋转问题中，确定了一个速度分量 VZ 就不会覆盖广义对称条件。用户也可以使用下列方法施加对称边界条件：

GUI：Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Fluid/CFD｜Velocity｜On Enty，

弹出图 9-1 所示的在实体上施加速度设置面板，ANSYS 支持在模型的线（Lines）、面（Areas）和节点（Nodes）处施加恒定速度，勾选面板上的 Generalized Symmetry 选项，即可激活对称边界条件。

9.4 周期边界条件

两个边界上的条件虽然不确定但却相等。在一个边界处选择了节点后就发布宏 PERI、DX、DY 和 DZ，其中 DX、DY 和 DZ 为第二边界偏离第一边界的偏移量。将偏移量输入到已建立好的 FLOTRAN 坐标系中。两个边界处的网格必须保持一致。

9.5 相交边界条件

相交边界条件，即在表面间的相交处施加两种不同的边界条件，要么两个边界条件是合并的，要么其中一个优先于另一个。表 9-1 可以指导如何将边界条件施加到相交处。

表 9-1　相交出的边界条件

相交边界 1	相交边界 2	最终结果
内流：VX、VY、VZ 的值	壁面：VX、VY、VZ＝0	壁面覆盖内流
内流：VX、VY、VZ 的值	对称：VX 或 VY 或 VZ＝0	将内流与对称结合在一起
内流：VX、VY、VZ 的值	外流：P＝0	强化内流条件，而不是外流
对称：VX 或 VY 或 VZ＝0	外流：P＝0	壁面覆盖对称
对称：VX 或 VY 或 VZ＝0	壁面：X、VY、VZ＝0	壁面覆盖对称
壁面：VX、VY、VZ＝0	外流：P＝0	将壁面和外流条件结合在一起
广义对称	外流：P＝0	将广义对称和外流条件结合在一起

注意：内流、对称和壁面边界条件都会覆盖广义对称条件。

用户要确保在相交边界处施加恰当的条件，还要控制是否在线段两端或面的边上施加了边界条件。线段端点或面的边上的一个非零速度分量并不会取代相关节点处的已知存在的零速度条件。在壁面和进口相交处，会自动施加壁面条件。

如果将一个新的边界条件施加到一个具有有限元网格的固体模型上，就应该在传递新的载荷之前删除已经存在的节点边界条件。

9.6 湍流边界条件

如果激活了湍流模型，则必须指定边界条件。基于速度和比例系数，ANSYS 提供了进口的默认值。给定了一个进口速度大小 v，进口动能为

$$K_{\text{inlet}} = \frac{3}{2}[(\text{ININ})v]^2 \tag{9-1}$$

ININ 的默认值为 0.01，该值对应于进口湍流程度为 1%的情况。进口处的动能耗散



率为

$$\varepsilon_{\text{inlet}} = \frac{C_{\mu} k^{3/2}}{(\text{INSF})L} \tag{9-2}$$

INSF 值是一个用户控制的比例因子。计算中所有湍流模型都需要输入湍流参数，用户可通过下列方式设置湍流参数：

命令：FLDATA24,TURB

GUI：Main Menu | Preprocessor | FLOTRAN Set Up | Turbulence | Turbulence Param，弹出图 9-7 所示的湍流参数设置面板。由图可知，湍流参数共有四个，分别是入口强度（ININ）、入口比例因子（INSF）、湍流比（RATI）和能量方程中的施密特数（SCTT）。入口强度表示入口处的波动速度与入口速度幅值的比值；入口比例因子是入口区域长度的表征量，如果用户输入为正值，则入口的水力直径乘以该入口比例因子后的值，作为程序计算入口水力直径的参数，如果用户输入负值，则程序采用其绝对值作为入口的水力直径；湍流比表示初始湍流粘度与层流粘度的比值。图 9-7 给出以上四个湍流参数的默认值。SCTT 为施密特数，是一个无量纲的标量，定义为动力粘度和扩散系数的比值，用来描述同时有动量扩散及质量扩散的流体。

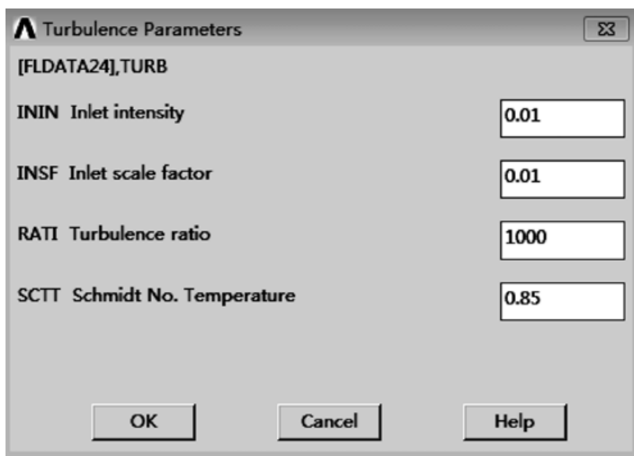


图 9-7 湍流参数设置面板

有时候对于某种情况需要激活湍流模型，但是对于某些区域又不能激活。为了在区域中停用湍流模型，则需要将动能设为 0，将耗散率设为 1。

注意：如果用户未指定边界，则在这种情况下，相对压力和速度都不知道。它最普遍的应用就是用于可压缩超声速流动中的下游边界处。

第 10 章　FLOTRAN 求解功能



10.1　FLOTRAN 的基本分析步骤

10.1.1　确定问题的区域

用户必须确定所分析问题的明确范围，将问题的边界设置在条件已知的地方，如果并不知道精确的边界条件而必须作假定时，就不要将分析的边界设在靠近感兴趣区域的地方，也不要将边界设在求解变量变化梯度大的地方。

有时，也许用户并不知道自己的问题中哪个地方梯度变化最大，这就要先作一个试探性的分析，然后再根据结果来修改分析区域。这些在后面章节中都有详述。

10.1.2　划分网格

用户必须事先确定流场中哪个地方流体的梯度变化较大，在这些地方，网格必须作适当的调整。例如：如果用了湍流模型，靠近壁面的区域的网格密度必须比层流模型密得多，如果太粗，该网格就不能在求解中捕捉到由于巨大的变化梯度对流动造成的显著影响，相反，那些长边与低梯度方向一致的单元可以有很大的长宽比。

为了得到精确的结果，应使用映射网格划分，因其能在边界上更好地保持恒定的网格特性。

10.1.3　施加边界条件

可在对确定的区域划分网格之前或之后对模型施加边界条件，此时要将模型所有的边界条件都考虑进去。如果与某个相关变量的条件没有加上去，则该变量沿边界的法向值的梯度将被假定为零。求解中，可在重启动之间改变边界条件的值，如果需改变边界条件的值或不小心忽略了某边界条件，可无须重启动，除非该改变引起了分析的不稳定。

10.1.4　设置流体状态

用户可以使用下列方式设置流体状态：

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up，弹出图 10-1 所示的求解选项设置面板，该面板包括 12 种选项：TRAN，该选项用于设置流体为稳态（Steady State）还是瞬态问题（Transient），默认选项为稳态；FLOW，该选项用于设置是否激活求解流体流动方程选项，默认为激活；TEMP，该选项用于设置是否考虑温度，默认为绝热选项，即不考虑温度；TURB，该选项用于设置流体为层流（Laminar）还是湍流（Turbulent），默认设置为层流；COMP，该选项用于设置流体为可压缩还是不可压缩，默认设置为不可压缩；VOF，该

选项用于设置是否激活流体的液体-气体二相功能，默认设置为关闭；SFTS，该选项用于设置是否考虑流体的表面张力影响，默认设置为关闭不考虑；IVSH，该选项用于设置是否激活不可压缩流体的粘性生热，默认设置为关闭；SWRL，该选项用于设置是否激活轴对称涡流，默认设置为关闭；SPEC，该选项用于设置是否激活流体的多组分传输功能，默认设置为关闭；ALE，该选项用于设置是否激活流体的动网格功能，默认设置为关闭；RDSF，该选项用于设置是否激活求解流体辐射度方程，默认为激活。

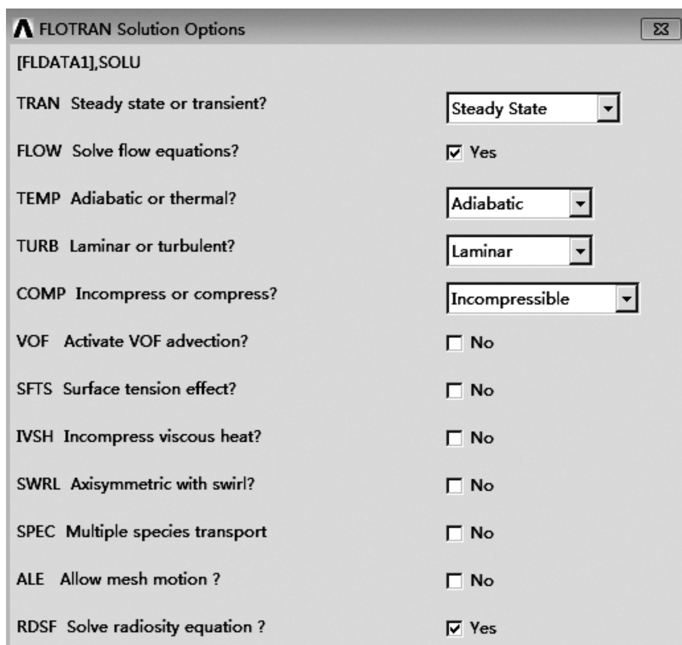


图 10-1　求解选项设置面板

通常用雷诺数来判别流体是层流或湍流，雷诺数反映了惯性力和粘性力的相对强度。通常用马赫数来判别流体是否可压缩。流场中任意一点的马赫数是该点流体速度与该点声速的比值，当马赫数大于 0.3 时，就应考虑用可压缩算法来进行求解；当马赫数大于 0.7 时，可压缩算法与不可压缩算法之间就会有极其明显的差异。

10.1.5 设置 FLOTRAN 计算参数

用户在此需要估计流体的特征，流体的特征是流体性质、几何边界及流场的速度幅值的函数。FLOTRAN 能求解的流体包括气流和液流，其性质可随温度而发生显著变化，FLOTRAN 中的气流只能是理想气体。用户须自己确定温度对流体的密度、粘性和热传导系数的影响是否很重要，在大多数情况下，近似认为流体性质是常数，即不随温度而变化，都可以得到足够精确的解。此外，用户根据模型的计算需求，还需要设置求解控制，输出等。

10.1.6 求解

通过观察求解过程中相关变量的改变率，可以监视求解的收敛性及稳定性。这些变量包括速度、压力、温度、动能（ENKE 自由度）和动能耗散率（ENDS 自由度）等湍流量以及

有效粘性（EVIS）。一个分析通常需要多次重启动。

10.1.7 检查结果



可对输出结果进行后处理，也可在打印输出文件里对结果进行检查，此时用户应使用自己的工程经验来估计所用的求解手段、所定义的流体性质及所加的边界条件的可信程度。

通过以上 7 个步骤，用户可以完成基本的流体分析，但对于一些特殊问题的求解，如热分析、瞬态分析、VOF、多组分传输和 ALE 等，还需要进行一些特殊的设置，下面将给用户作具体介绍。

10.2 热分析

如果用户激活热分析，则程序通过求解温度方程来确定流体区域温度。如果流体物性参数随温度变化剧烈，则必须激活热分析功能，从而可以考虑温度对流体物性参数的影响，进而提高计算的准确度。

基于假设的环境温度或绝热温度，FLOTRAN 可以计算温度场，求解边界上的热通量和边界上的对流换热系数等热参数。对于可压缩流体，FLOTRAN 可以自动地考虑粘性生热。

10.2.1 网格要求

ANSYS 没有提供规范的有限元网格的评估准则。但是，在热边界附近，尤其在热通量边界存在及其大的热梯度，因此，热边界附近的网格通常应该加密。由于流体换热分析一般求解的规模都较大，因此为加快计算速度，提高计算收敛性，并提高求解精度，应尽可能采用映射网格。

10.2.2 指定流体属性参数

除了密度和粘度外，热流体分析还须指定流体的导热系数和比热容。用户负责确定流体属性参数是否随温度变化。

10.2.3 热载荷和边界条件

ANSYS 程序支持六种热边界条件：

1）恒温。

2）恒定热通量。

3）施加与室温相关联的对流换热系数。

4）与表面辐射和室温相关联的环境辐射。

5）与发射率相关联的面-面辐射。

6）绝热边界（默认条件）

此外，恒定体积热源可位于流体和非流体区域。

表 10-1 给出了施加载荷命令和 GUI 路径，用户可以使用表格类型数组参数施加自定义的边界条件。用户也可以使用函数功能施加边界条件。

表 10-1 施加载荷命令和 GUI 路径

载荷类型	种 类	命令族	GUI Path
温度（TEMP）	约束	D	Main Menu丨Solution丨Define Loads丨Apply丨Temperature
对流（CONV）	面载荷	SF	Main Menu丨Solution丨Define Loads丨Apply丨Thermal丨Convection
热通量（HFLU）			Main Menu丨Solution丨Define Loads丨Apply丨Thermal丨Heat Flux
辐射（RAD）			Main Menu丨Solution丨Define Loads丨Apply丨Thermal丨Ambient Rad
面-面辐射（RDSF）			Main Menu丨Solution丨Define Loads丨Apply丨Thermal丨Surface Rad
热生成率（HGEN）	体载荷	BF	Main Menu丨Solution丨Define Loads丨Apply丨Fluid/CFD丨Heat Generate

下面给出了指定的边界条件和相对的计算参数类型：

- 对于温度边界条件，计算热通量和对流换热系数。
- 对于热通量边界条件，计算温度和对流换热系数。
- 对于环境辐射边界条件，计算温度和热通量。
- 对于面-面辐射边界条件，计算温度和热通量。
- 对于传热边界条件，计算温度和热通量。
- 对于绝热边界，计算温度。

当用户施加对流换热系数时，需要指定相关的环境温度。ANSYS 使用对流换热系数和表面温度计算边界上的热通量。

在模型的外边界可以指定热通量和对流换热系数。但是，用户不能在内表面指定热通量和对流换热系数。用户可以在界面边界处指定热通量和对流换热系数（heat transfer coefficients），但是 FLOTRAN 会弹出警告信息，因为这种边界条件可能是不正确的。在标准的 FLOTRAN 分析中，流-固界面的热传导是期望的求解结果，而不是边界条件。如果用户希望施加热通量或对流换热系数，应该将其施加到外部的固体材料边界或是不考虑固体材料的流体区域边界处。如果用户在流-固界面指定了一个对流换热系数或热通量，则 FLOTRAN 将把该条件视为一个线或面热源。此外，用户可以在模型的任何地方定义温度。

计算表面的对流换热系数时，ANSYS 使用表面温度和用户指定的环境温度（bulk temperature）进行计算：

命令：FLDATA14,TEMP,BULK,Value

GUI：Main Menu丨Solution丨FLOTRAN Set Up丨Flow Environment丨Ref Conditions

如果计算的对象为可压缩流体，边界条件上的温度就是总温，并且温度方程是以总温的形式进行表示和求解的。

FLOTRAN 环境辐射载荷可以模拟以一个恒定的温度项空间辐射传热的问题。使用 SF 命令指定该恒定温度，使用 STEF 命令指定 Stefan-Boltzmann 常数，假定形状因子为 1。因为复合能够穿透流体区域并照射在固体上，所以可以在流-固界面和外部模型边界上施加面载荷。在这种情况下，用户可以将表面载荷施加到流体或固体单元面上或已经定义了界面的固体模型中。

10.2.4 求解策略

求解热流体问题最有效的方法取决于流体物性依赖于温度的程度。

1．恒定流体属性参数

在这种情况下，流场解根本不依赖于温度场，且在不激活温度方程求解的条件下达到收敛。一旦完成了流动解，温度方程成为线性方程。将温度松弛因子设置为 1 后，在一个总体迭代内即可完成温度场求解。设置温度松弛因子的方式如下：

命令：FLDATA25,RELX,TEMP,1.0

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN SetUp | Relax/Stab/Cap/DOF Relaxation

Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Relax/Stab/Cap/Prop Relaxation

求解温度方程的过程中，不需要求解流体方程。执行两次总体迭代会导致很小的变化，从收敛监视图中可以反映出这一特点。

2．强制对流，与温度相关的流体属性参数

流体流动模式与流体温度场的相关性不大。在激活求解温度方程之前，用户可以选择在每一个总体迭代过程中求解温度方程，用户也可以在收敛的流体流动场中求解温度方程。对于后一种情况，仍然需要用户同时求解流动和温度方程以便能够考虑流体属性随流体温度变化这一问题。如果初始求解温度方程难以收敛，则建议用户关闭流体属性随温度变化的选项。

对于不可压缩流体，粘性生热一般对低普朗克数或中低速流动情况不重要。但是，当普朗克数大于 2 或速度很高时，则应当打开粘性生热选项，对可压缩流体，FLOTRAN 自动考虑粘性生热作用，用下列方法激活不可压缩流体粘性生热：

命令：FLDATA1,SOLU,IVSH,T

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Solution Options

3．自由对流，与温度相关的流体属性参数

在这种情况下，流动的驱动力来源于由温度变化而引起的密度的变化，必须同时激活求解流动和温度选项，而且还必须进行以下几步：

（1）激活重力加速度

命令：ACEL

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Flow Environment | Gravity

（2）激活变化密度

命令：FLDATA13,VARY,Label,TRUE (Label = fluid property)

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Fluid properties

浮力属性类型，对于空气根据理想气体定律使用常压计算密度，这样在密度计算中阻止了由于压力脉动而引起的不稳定。自然对流情况收敛慢。如果对于压力和温度方程使用 TDMA 算法，则计算更容易收敛，并且建议用户将扫描数设置为 100。

4．共轭传热

当非流体材料的热属性参数与流体热属性参数相差几个数量级时，就是病态的共轭传热问题，在这种条件下，不管推进多少步 TDMA 算法，可能都不会产生有用的结果。对于温度方程的求解，TDMA 方法是默认方法。用户可以使用下列方法激活 TDMA 方法：

命令：FLDATA18,METH,TEMP,1

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | CFD Solver Controls | Temp Solver CFD

与 TDMA 方法相比，共轭残差法提供了更好的功能，且需要较少的内存。使用下列方法可激活共轭残差法：

命令：FLDATA18,METH,TEMP,2

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | CFD Solver Controls | Temp Solver CFD

为提供性能，可以控制几个参数，例如收敛准则和搜索矢量个数，尽管共轭残差法求解速度很快，但不适用于求解困难问题。求解病态传热问题得到一个更好的选择就是预条件共轭残差法（PCR），它与 TDMA 方法或共轭残差法需要更多的内存。PCR 方法允许控制搜索矢量个数最多达 30 个。

可用下列方法设置搜索矢量个数：

命令：FLDATA18,METH,TEMP,3

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | CFD Solver Controls | Temp Solver CFD

注意：对于仅与固体节点相连的节点，在 Jobname.rfl 文件中，密度（DENS）项下存取的值为密度为比热容的乘积。

最稳定的也是最占用内存的求解共轭传热问题的方法是预条件广义最小残差法（PGMR）。用户可使用下列方法选择温度方程求解：

命令：FLDATA18,METH,TEMP,4

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | CFD Solver Controls | Temp Solver CFD

预条件广义最小残差法（PGMR）是温度求解的默认选择。尽管 PGMR 方法和 PCCR 求解器存在相同的用户控制参数，但默认值是不同的，对 PGMR 容许的最低限定收敛准则是 1×10^{-10}，如果用户修改更松的收敛准则，FLOTRAN 将会将其改变到 1×10^{-8}。对于有些问题，将收敛准则设置为 1×10^{-20} 也是必要的。此外，用户应该至少使用 12 个搜索矢量，FLOTRAN 能够保证这种情况。对于 PGMR 求解器，12 个搜索矢量为默认值，并且根据需要可以将其允许范围修改为 20 个搜索矢量。

FLOTRAN 非流体单元支持温度相关和正交各向异性属性变化，及 KXX、KYY 和 KZZ 能假设为不同的值和温度的变化。FLOTRAN 将非流体单元的导热系数视为一个单元量，在单元的积分点上计算。但是对于流体单元，FLOTRAN 则认为导热系数是一个节点量。可使用下列方式指定变化和正交各向异性导热系数：

命令：MP 或 MPDATA

GUI：Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models | CFD | Conductivity | Orthotropic

注意：热分析问题中如果包含了随温度变化的导热系数，则该热问题是非线性的，并且需要多次迭代才能获得解答。可变的固体导热系数不需要松弛。

对于共轭传热问题，在求解耦合的能量/动量方程之前，先求解一个初始温度解是较为明智的做法。

使用下列方法完成求解温度：

命令：FLDATA1,SOLU,FLOW,F

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Solution Options



命令：FLDATA1,SOLU,TEMP,T

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Solution Options

命令：FLDATA25,RELX,TEMP,1.0

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Relax/Stab/Cap | DOF Relaxation

命令：FLDATA2,ITER,EXEC,1

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Execution Ctrl

命令：FLDATA18,METH,TEMP,3

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | CFD Solver Contr | TEMP Solver CFD

在以上步骤中，初始温度是从导热方程中求解获得的。

FLOTRAN 对共轭传热问题计算壁面的对流传热系数，可以用两种方法来达到这个目的：导热矩阵算法和温度场算法。导热矩阵算法使用热传导矩阵计算热通量和对流换热系数，这是默认方法。一般的，对良好单元形状的模型将会有满意的结果，然而如果单元形状不好，可以产生不光滑的结果，应当换成温度场算法，它直接从热梯度计算对流换热系数。使用下列方式选择算法：

命令：FLDATA37,ALGR,HFLM,Value

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Algorithm Ctr

5．热平衡

使用 Jobname.pfl 文件的信息，可计算问题的热平衡。对于任何一个激活了热选项的流动问题，计算并列表流入和流出问题的计算域进口/出口的能量；对于流动边界也计算了通过边界面的导热。流动边界流入和流出系列的能量之差应等于通过热源或散热器加入系统的能量。

如果激活了流线迎风（SUPG）方法处理能量方程中的对流项，可以达到更准确的能量平衡。一般来讲，流线迎风（SUPG）方法比单调的流线迎风（MSC）方法提供更准确的能量平衡。如果希望得到精确的能量平衡，使用 Collocated Galerkin（COLG）方法。对稳态不可压缩流体，它提供了更精确的能量平衡，即便是对粗糙的网格。

然而，SUPG 和 COLG 方法可能会在具有粗糙壁面网格处产生热求解的振荡性。使用 FLDATA40，WADV 命令，以尽量减少这样的空间振荡。

系统流量边界的能量流动的进出等于质量、比热容和温度的乘积。由 TOFFST 命令定义的温度偏移量并不参与计算，正数表面热流进入系统。

能量源包括流体或固体中的体积热源。指定壁面温度和壁面对流换热系数边界条件，就是指定热源和散热器，指定热通量也等于指定热源或散热器。而到底是热源或是散热器，在前一种边界条件取决于温度梯度，在后一种边界条件则取决于热通量的符号。热量传入传出壁面是流体区域的边界而不是流体的进出口边界。正值表面热流流入流体。

体积生热可加在固体或流体区域，值得注意的是当计算能量平衡时，应避免两次都考虑固体内生成的热。假如，假设一个在固体区域内有体积热源的共轭传热问题，固体因流体流动为冷却，能量的流进和流出之差等于向壁面的传热，这个数也应与固体的体积生热

相匹配。

对于所有情况，在流体边界流进系统的能量与流出系统能量之差应等于向壁面传热加上流体体积热源，再加上在流动边界上垂直于流动方向的热传导。

本来 FLOTRAN 只在流体区域进行热平衡，热流和对流换热系数只是外部流体边界的输出结果，加到外部边界的热流不是输出结果的一部分。

6．基于辐射度方法计算面-面辐射

FLOTRAN 面—面辐射分析可用于求解涉及两个或更多辐射的开放或封闭系统的一般辐射问题。该方法同时支持 FLOTRAN 二维和三维单元 FLUID141 和 FLUID142。热辐射分析要求热求解选项必须打开。可以使用 FLDATA1, SOLU, RDSF 命令控制辐射分析的开关，该命令默认是打开的。

面-面辐射分析支持平面关于 YR 和 XR 坐标系轴对称模型；辐射分析不支持三维/二维可压缩流动热分析和 R-θ、R-θ-坐标系的二维和三维分析。

（1）过程

辐射求解包括四个步骤：

1）定义辐射表面。

2）定义求解选项。

3）定义观察角系数选项。

4）计算和查看观察角系数。

（2）热平衡

Jobname.pfl 文件提供了从固体和流体表面的净正或负辐射换热。

10.3　瞬态分析

用户可以使用下列方式设置流体求解选项，激活流体瞬态分析：

命令：FLDATA1,SOLU,TRAN,TRUE

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Solution Options

用户必须自己确定时间步长、时间步内的收敛方法，求解问题的总时间和输出频率。可以使用下列方法设置瞬态分析的执行控制和输出：

命令：FLDATA4,TIME 和 FLDATA4A,STEP

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Execution Ctrl

10.3.1　时间积分方法

程序提供了向后差分和 Newmar 两种时间积分方法，其中向后差分法为默认的瞬态计算方法。当使用 Newmark 方法时，可以引入数值阻尼来使求解更加稳定。用户可以使用下列方法设置时间积分方法：

命令：FLDATA4,TIME,METH,NEWM

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Transient Contrl | Time Integration Meth，弹出图 10-2 所示的时间积分方法设置面板，用户可以选择面板上的 Newmark 来激活纽马克方法，单击 OK 按钮，则弹出图 10-3 所示的 Newmark 方法中数值阻尼设置面板。

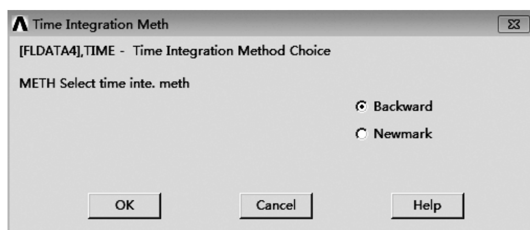


图 10-2 时间积分方法设置面板

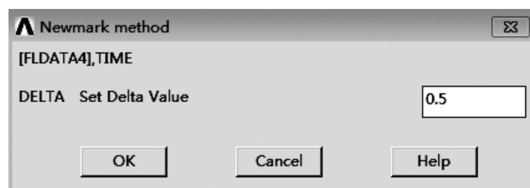


图 10-3 Newmark 方法中数值阻尼设置面板

用户可以在面板中直接输入数值阻尼值。数值阻尼值必须大于等于 0.5，默认值为 0.5，建议用户设置的范围为 0.5～0.6。设置过高的值，会使求解更加稳定，更加容易收敛，但是求解精度会下降；设置过低的值，会产生更加精确的结果，但是计算收敛困难。默认值 0.5 对应为二阶求解精度。

对于瞬态分析，用户可以设置两种质量矩阵类型：集中质量矩阵和一致质量矩阵，一致质量矩阵比集中质量矩阵更加精确，用户可以使用下列方式设置质量矩阵类型：

命令：FLDATA38,MASS,Label,CONS MSMASS,SPNUM,CONS

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Transient Contrl | Mass Type，弹出图 10-4 所示的质量类型设置面板，其中 LUMP 代表集中质量矩阵，CONS 代表一致质量矩阵。

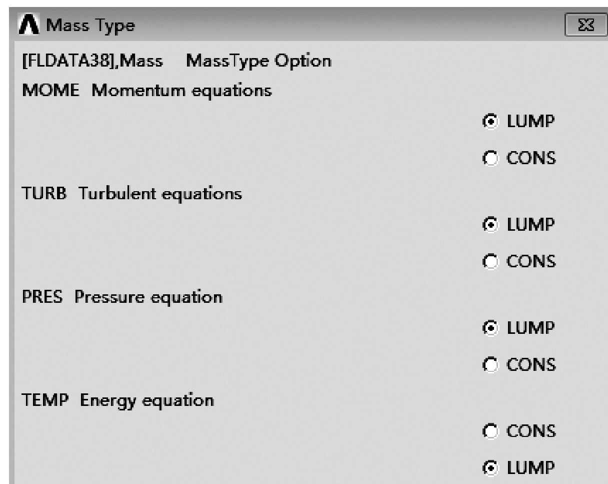


图 10-4 质量类型设置面板

10.3.2 设置时间步和收敛

因为程序使用隐式求解算法，在求解时间步长中不存在稳定性限制。用户可以使用下列方法设置时间步长：

命令：FLDATA4A,TIME,STEP,Value

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Execution Ctrl，弹出图 10-5 所示的时间步控制设置面板，该面板包括选择时间步长控制类型和输出控制选项。

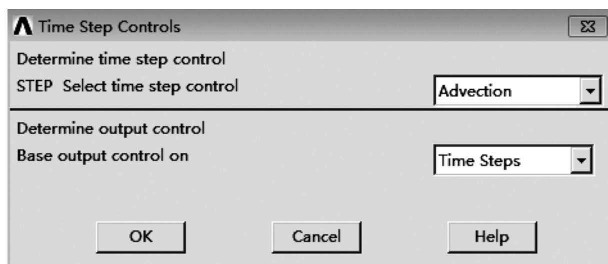


图 10-5　时间步控制设置面板

时间步控制类型包括对流限制（Advection），用户选择该选项后可以防止在一个时间步长内流体微团完全通过一个单元；压力波限制（Press wave），当用户设置求解可压缩流体时，则该选项可用，压力波限制将控制时间步长小到在一个时间步长内，压力波不能完整地通过任何一个单元；取压力波和对流限制中最小值（Less of 2 above），选项也只对可压缩流体分析有效，用户使用该选项意味着将强迫使用更严格时间步长；用户自定义（User defined），用户使用该选项后可以根据需要自己设置求解的时间步长。

FLOTRAN 在时间步内必须执行总体迭代数来实现计算收敛，当满足收敛准则或在时间步内允许的最大总体迭代数执行完毕时，时间终止。用户可以使用下列方式设置总体迭代次数：

命令：FLDATA4A,TIME,GLOB,Value

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Execution Ctrl

收敛准则是一些给定的数值，每一个激活的自由度的收敛值必须定义其相应的收敛准则才会终止计算，用户可以使用下列方式设置计算的收敛值：

命令：FLDATA4,TIME,Label,Value

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Execution Ctrl

一旦满足所有收敛准则，则终止时间步。如果没有满足收敛检测准则，但是达到了最大总体迭代次数，则计算也会终止。

如果问题是绝热的，则只检查压力方程的检查值。如果还同时求解温度方程，压力和温度的检查值都必须小于收敛准则值。

当满足所有收敛准则时，时间步迭代就会终止，而当在时间步内达到了允许的全局迭代数后，即使不满足收敛准则，时间步迭代也会终止。

10.3.3 终止计算和输出控制

对于 FLOTRAN 瞬态分析，用户可以在分析前指定计算的结束时间，也可以在计算完一定的时间步后终止计算，用户可以使用下列方式设置终止时间：

命令：FLDATA4,TIME,TEND,Value

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Execution Ctrl

要确定 ANSYS 保存分析结果的频率，以及写出信息到 Jobname.pfl 文件的频率，用户可以使用下列方式：

命令：FLDATA4,TIME,Label,Value 和 FLDATA4A,STEP,Label,Value

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Execution Ctrl，弹出图 10-5 所示的时间步控制设置面板，该面板中的输出控制选项包括三种类型，即时间值、时间步和两者同时考虑。选择 Both 选项，单击 OK 按钮，弹出图 10-6 所示的瞬态控制中的输出控制字面板，该面板包括以下六个选项：STEP,OVER，该选项表明每隔 *n* 个时间步覆盖临时结果；TIME,OVER，该选项表明每隔 *x* s 覆盖临时结果；STEP,APPE，该选项表明每隔 *n* 个时间步输出一次计算结果到 Jobname.rfl；TIME,APPE，该选项表明每隔 *x* s 输出一次计算结果到 Jobname.rfl；STEP,SUMF，该选项表明每隔 *n* 个时间步将结果汇总输出到 Jobname.rfl；TIME,SUMF，该选项表明每隔 *x* s 将结果汇总输出到 Jobname.rfl。

Overwrite frequency to results file	
STEP,OVER Number of time steps	0
TIME,OVER Time interval	0
Append frequency to results file	
STEP,APPE Number of time steps	0
TIME,APPE Time interval	1000000
Summary frequency to output file	
STEP,SUMF Number of time steps	0
TIME,SUMF Time interval	1000000

图 10-6 瞬态控制中的输出控制字面板

10.3.4 施加瞬态分析边界条件

当任何一个边界条件发生变化时，FLOTRAN 假设要么阶跃（默认设置），要么是斜坡变化，通过下列方法之一，可以设置 TIME 项的 BC 标号值为 1，即可定义载荷为斜坡变化。

命令：FLDATA4,TIME,BC,1

GUI：Main Menu | Preprocessor | FLOTRAN Setup | Execution Control，弹出图 10-5 所示的时间步控制设置面板，单击 OK 按钮，弹出图 10-7 所示的瞬态控制中的瞬态边界条件设置面板，该面板包括两个选项：载荷阶跃变化（Step Change）和载荷线性斜坡变化（Linear Ramp）。

[FLDATA4]-Transient Boundary Condition Application

TIME,BC Apply Varying B.C. as

◉ Step Change

○ Linear Ramp

图 10-7 瞬态控制中的瞬态边界条件设置面板

对于用户指定的执行，在下一个执行周期内边界条件将按斜坡变化。这是当前时间（即执行开始）和通过下列方法指定的结束时间之差：

命令：FLDATA4,TIME,TEND,Value

GUI：Main Menu | Preprocessor | FLOTRAN Setup | Execution Control

旧边界条件和新边界条件之间为斜坡变化。FLOTRAN 一旦进入该边界所在的计算循环，该边界条件就会成为旧的。这意味着在开始分析时要使用斜坡条件，必须要使用初值条件（施加为一次边界条件）来执行一次零迭代（可用 FLOTRAN 命令完成），然后边界条件值变化到斜坡结束时的值。

注意斜坡载荷的作用时间为 TEND 而不是实际的计算结束时间，因此建议用户使用 TIME 来控制而不是使用 STEP 来控制程序的中断运行。如果在 TEND 指定的时间之前中断运行，继续计算时边界条件将马上会由终止时的边界条件变化到当前的边界条件。

基于速度 DOF（VX、VY 和 VZ）的瞬态边界条件不能在零到非零值之间的斜坡变化，建议用户使用一个小的速度来代替零，这样，FLOTRAN 会把施加小速度的面识别为进口或者出口而不是壁面。

在任何时候，用户可以使用下列方法把施加的边界条件改为以前的状态：

命令：FLOCHECK,2

GUI：Main Menu | Preprocessor | FLOTRAN Setup | Flocheck，弹出图 10-8 所示的初始边界条件设置面板，该面板包括三种设置：不进行任何初始化（Do Not Init）、初始化所有载荷（Init.All）、仅初始化边界条件（Init Bc Only）。

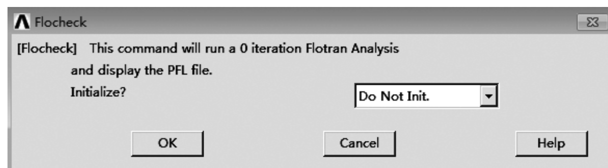


图 10-8 所示的初始边界条件设置面板

10.4 动网格（ALE）

ALE 即任意的拉格朗日—欧拉方程。流体流动问题往往涉及动接触面，这种界面可能是可动的内壁，也可能是可动的外壁或自由界面，对于这种问题可以使用 ALE 方法来求解。

要进行带有 ALE 方法的瞬态分析，必须同时激活 ALE 方法和瞬态求解算法，对于 ALE 方法，用户可以使用二维的 FLUID141 单元或三维的 FLUID142 单元。此外用户还可以使用 VOF 方法结合 ALE 方法联合模拟涉及自由表面移动壁面的流动问题。

本节主要介绍了 ALE 方法的基本概念、边界条件、网格的更新和重画等，并且通过实例讲解加深对 ALE 方法的理解。

10.4.1 边界条件

一般的，滑移和粘滞边界条件都可应用于移动的内外壁。表 10-2 给出滑移与粘滞边界条件对位移和速度定义的要求。

法向位移的时间导数必须等于法向速度。

滑移或粘滞边界条件可应用于位移。对速度，滑移边界条件应用于无粘流，粘滞边界条件应用于粘性流。所有情况下，法向位移的时间导数必须等于法向速度。在 FLOTRAN 中，

只有粘滞边界条件当前是有效的（FLOTRAN 现在只支持粘性流）。

表 10-2　滑移和粘滞边界条件对位移和速度定义的要求

<table>
<tr><th>边界条件</th><th>滑　移</th><th colspan="2">粘　滞</th></tr>
<tr><td rowspan="2">位移</td><td rowspan="2">指定流体节点的法向位移分量就是指定下列
$D_n = dn$</td><td>二维</td><td>三维</td></tr>
<tr><td>$D_n = dn$， $D_\tau = d\tau$ 或
D_x， D_y</td><td>$D_n = dn$， $D_{\tau_1} = d\tau_1$， $D_{\tau_2} = d\tau_2$ 或
D_x， D_y， D_z</td></tr>
<tr><td rowspan="3">速度</td><td rowspan="3">对于无粘流，指定流体节点的法向速度分量就是指定下列
$v_n = vn$</td><td colspan="2">粘性流，指定流体节点的所有速度分量</td></tr>
<tr><td>二维</td><td>三维</td></tr>
<tr><td>$v_n = vn$， $v_\tau = v\tau$
或
v_x， v_y</td><td>$v_n = vn$， $v_{\tau_1} = v\tau_1$，
$v_{\tau_2} = v\tau_2$ 或
v_x， v_y， v_z</td></tr>
</table>

使用以下方式设置节点的位移或速度的边界条件：

命令：D

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Displacement (or Velocity) | On Nodes

使用以下方式设置固体模型上的边界条件：

命令：DL 或 DA

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Displacement (or Velocity) | On Lines

Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Displacement (or Velocity) | On Areas

如果节点是分布阻尼、风扇模型或 FLUID141 及 FLUID142 固体区域的一部分，可以自动施加均匀位移边界条件：二维情况使用 D,ALL,UX,0,0 和 D,ALL,UY,0 命令；三维情况使用 D,ALL,UX,0.0, D,ALL,UY,0.0, 和 D,ALL,UZ,0.0 命令。

还可以指定部分位移边界条件让外界节点沿一个总体坐标轴移动。例如，D,ALL,UX,0,0 将使一组二维模型的节点沿 *Y* 轴移动。当前不能定义外边界的法向和切向位移分量。

还可以定义一般对称边界条件。如果激活了 ALE 方法，速度分量将等于网格速度，设置的命令如下：

```
D,NODE,ENDS, −1
DL,LINE,AREA,ENDS, −1,Value2
DA,AREA,ENDS, −1,Value2
```

10.4.2 网格更新

ALE 形式使用 D,DL,DA 命令定义的唯一边界条件来更新有限元网格。相对于前一时间步，它在时间步的开始阶段确定位移。对每一时间步长、一个弹性网格随算法更新网格。该算法确保保留边界层（即网格较细区域的节点将比粗糙网格区域的节点移动得少）。

如果网格移动失败，瞬态分析将不能进行下去。如果网格移动独立于流体求解，在进行

流体分析前可以单步调试随移算法来确定随移算法是否失效。使用下列命令序列实现：

```
/solu
.
.
fldata,solu,turb,f
fldata,solu,temp,f
fldata,solu,spec,f
fldata,solu,ale,t
fldata,solu,flow,f
solve
```

10.4.3 重画网格

大流体区域变化会产生质量差的单元和网格变形失败。为了避免单元失败，用户必须重画网格。

使用以下方式完成重画：

命令：FLDATA39,REMESH

GUI: Main Menu | Preprocessor | FLOTRAN Set Up | Remesh Ctrl

FLDATA39,REMESH 命令自动地重画流体单元和线性地从老网格插值到新网格。对于重画网格，用户需要指定三个最大可允许的单元质量：长宽比，单元尺寸变化和单元长宽比的变化。另外，对于重画网格，还存在一些重要的重画限制。

10.5 流体体积法（VOF）

10.5.1 VOF 基本理论

自由表面是指一种气体和液体之间的界面，其中这两种流体的密度差异非常大。由于气体的密度较小，因此可以忽略气体的惯性影响，仅需考虑作用于界面上的气体压力。所以，气体区域不需要进行模拟，自由面可以简化为承受恒定压力的界面。基于流体体积分数（fractional volume of fluid）概念，流体体积法（VOF）可以确定自由面的形状和位置。体积分数等于 1 时表面，整个单元都充满了流体；体积分数等于 0 时，整个单元都没有流体。VFRC 值在 0～1 之间变化反映了流体在单元中所占的比例。通常，模拟自由表面的演变可以使用 VOF 对流算法或者通过下面的方程进行计算

$$\frac{\partial F}{\partial t}+\vec{u}\cdot\nabla F=0 \tag{10-1}$$

式中，∇ 为梯度算子；F 为体积分数；$\vec{u}$ 为流场位移矢量。

为了能够研究复杂的流动问题，在最初的 VOF 算法基础上已经开发出适用于非结构化的网格。

在 VOF 分析中，FLOTRAN 使用对流算法（advection algorithm）确定流体体积分数一般跟踪自由面的发展。每一个单元的中的 VFRC 值为 0～1，0 表明单元中没有流体，1 表面

单元中充满流体。

对于气体和液体之间的界面动态行为，FLOTRAN 使用连续表面力（CSF）方法计算表面张力。表面张力是材料界面的固有特征。它是一个作用于界面的局部表面力。FLOTRAN 重新计算将表面力放入到动力方程中的等效体积力。流体表面张力包括两个分量：垂直于界面的法向分量，平行于界面的切向分量。当前，VOF 计算仅适用于二维平板或轴对称的具有四边形单元的模型。对于 VOF 分析，施加了边界条件的节点必须至少有一个属于非空单元。为了激活 VOF 分析和模拟计算表面张力影响，使用下列方式：

命令：FLDATA1,SOLU,VOF,Value

FLDATA1,SOLU,SFTS,Value

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Setup | Solution Options

在 FLOTRAN 中，VOF 算法首先按照拉格朗日方程计算流体多边形的运动，然后利用两个多边形相交的计算几何模型确定 VFRC 通量。这种方法称为计算拉格朗日-欧拉对流映射法。这种 CLEAR-VOF 方法明确地按时间追踪自由表面，因此对 VOF 分析有必要激活瞬态求解选项。为保证准确，应当使用流线迎风 Petrov-Galerkin（SUPG）方法。当遇到收敛困难时，减短时间步长，并激活改进的惯性松弛程序（MIR）。

注意：*用户必须避免使用四边形单元，只在一个节点上流入或流出的边界。*

10.5.2 VFRC 载荷

当执行 VOF 分析时，用户需要施加初始条件和边界 VFRC 载荷。在大多数情况，默认值是合适的。

1．初始 VFRC 载荷

按通常方式，用户为速度和其他自由度施加初始条件。对于初始 VFRC 场，用户可以将每一个单元定义为完全充满流体、部分充满流体和完全没有流体。每一个部分充满流体的单元必须与至少一个完整单元和一个空单元相邻。在求解中，如果充满部分流体的单元周围没有完全充满流体的单元，则该单元会被置为空单元。因此，在自由表面上方至少应包括一层空单元，应使表面随时间变化而变化。

为了设置初始体积分数场，可用下列方法进行设置：

命令：ICE,ELEM,VFRC,Value

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Volume Fract | Init Loads | On Elements，弹出拾取对话框，选择相应的单元，单击 OK 按钮，弹出图 10-9 所示的在单元上施加初始 VFRC 载荷设置面板，输入 VFRC 值即可。

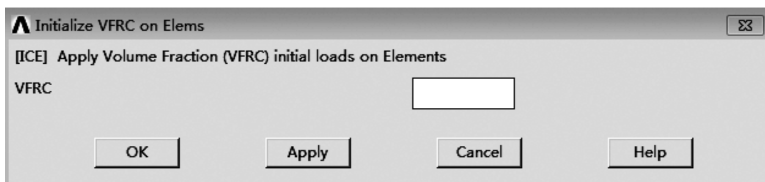


图 10-9　在单元上施加初始 VFRC 载荷设置面板

体积分数默认值为 0，所以如果求解的问题域中初始就存在流体，则用户必须设置相应的 VFRC 场。

可以使用下列方式设置一个给定几何图形的初始体积分数：

命令：ICVFRC,GEOM, VAL1,VAL2,VAL3,VAL4

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Volume Frac | Init Loads | By Geom

ICVFRC 会自动计算所有选定单元的体积分数值，这些选定单元或者在给定几何图形的内部或者与之相交。体积分数值为：

- 单元完全在几何图形内部时等于 1。
- 单元与几何图形边界相交时等于位于几何图形内部的单元面积。

当前，FLOTRAN 提供了两种有效的几何图形：圆形（CIRC）和椭圆（ELPT）。对于一个圆形或椭圆，VAL1 和 VAL2 分别代表其中心的 *X* 和 *Y* 坐标。对于圆形，VAL3 代表圆形的半径，VAL4 无效；VAL3 和 VAL4 分别代表了椭圆的 *X* 和 *Y* 半轴。

为了显示初始的体积分数载荷，使用以下操作：

命令：/PICE,VFRC,,KEY

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Symbols

/PBF 和/PSF 命令优于/PICE 命令。

2．边界上 VFRC 载荷

使用通用方法，用户为速度和其他自由度设置边界条件。虽然流体区域外部的边界条件最初没有物理意义，但是如果流体接触到这些边界，则这些边界就开始起作用。相应地，在通过流体潜在接触的所有边界上施加所有适当的边界条件。FLOTRAN 使用自然条件来处理不确定的边界。

VFRC 载荷的边界条件由自由边界 VFRC 值和湿润状况组成。对于边界 VFRC 值，FLOTRAN 仅允许 0 和 1 值。默认情况下，边界 VFRC 值设置为 1。当边界与表面单元相邻时，FLOTRAN 使用边界 VFRC 值来确定 VOF 重建阶段的垂直表面方向。润湿情况可以确定流体能否被输送到问题区域。0 值表明没有润湿边界，而 1 值表明有润湿边界。默认情况下，润湿情况设置为 0（没有润湿边界），而相应的边界 VFRC 值必须设为 1 才有意义。在一个没有润湿的边界上，并没有发生流体的输出或者空单元进入问题区域。边界 VFRC 值仅用于帮助确定垂直方向。

使用下列方法设置边界 VFRC 值：

命令：SFL,LINE,VFRC/SFE,ELEM,LKEY,VFRC,

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Volume Fract | Bound Loads | On Lines/ Elements，弹出拾取对话框，假设拾取单元，单击 OK 按钮，弹出图 10-10 所示的在单元上施加 VFRC 载荷设置面板，该面板包括三个选项：设置面号（Face number），由于 VOF 分析暂只支持二维模型，因此该项保持默认值即可；设置边界处的 VOF 值（Boundary Value），默认值为 1，用户可以根据需要进行修改；设置边界处的润湿状态（Wetting Status value），默认值为 0，即非润湿，用户可以根据需要进行修改，在润湿边界上，流体逆流可以保持相关单元的完整。

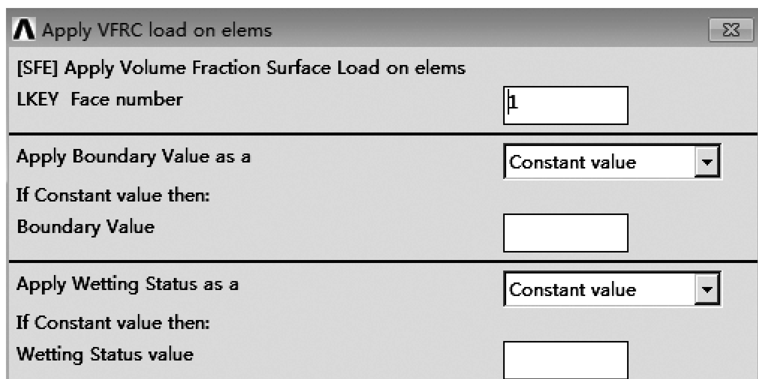


图 10-10 在单元上施加 VFRC 载荷设置面板

10.5.3 输入设置

当执行 VOF 分析时，可以设置与外界条件相关的环境条件，VFRC 公差以及时间步长（time stepping strategy）。当研究表明张力效应时，需对表面张力系数和壁面静态接触角设定合适的值。关于这些性质类型的信息可以参考 FLOTRAN 流体性质的设定。

1．外界条件

对以下的变量设置流体区域外部的外界节点值：

VX——U 速度。

VY——V 速度。

VZ——W 速度。

TEMP——温度。

ENKE——湍流动能。

ENDS——湍流动能耗散率。

使用以下方法之一：

命令：FLDATA36,AMBV, Label,Value

GUI：Main Menu｜Solution｜FLOTRAN Setup｜VOF Environment｜Ambient Condition

当一个节点符合 Dirichlet 条件并且位于流体区域外部时，这个节点上赋予的外界值可以忽略不计。一旦与之相关的单元变为局部完整或完全完整时，所指定的 Dirichlet 条件就会起作用。除了压力以外，外界值仅为了后处理而设。压力作为一个实际的边界条件。

不像其他的 FLOTRAN 分析那样，VOF 分析的压力场同时包括动压和静压，并且动压平衡于重力加速度项。例如，在 VOF 分析中，一个考虑重力的平行均匀流动的等压线由具有与重力平衡的梯度的平行线组成，而在其他 FLOTRAN 分析中这些等压线保持恒定。

在 VOF 分析中，出口有一定的压力或者具有自然条件。当出口压力确定时，其值不同于其他 FLOTRAN 分析中与静压非偏移（或高程水头）相关的压力值。对于自然边界条件，出口压力会自动调整，在这种情况下，如果存在一个稳定解，出口压力就会收敛于修正值。

2．VFRC 容差

理想情况下，VFRC 值为 1 时表明单元内充满了流体，VFRC 值为 0 时表明单元内没有流体。然而实际上由于不同类型的误差累积，0 或 1 的精确值在 VOF 水平对流算法中，则很

难维持。因此，FLOTRAN 引入较小终止值来确定单元的满与空。如果 VFRC 值大于或等于 1−VOFU，就认为单元是完整单元，其中 VOFU 为 VOF 水平对流算法中的上限值。如果 VFRC 值小于或等于 VOFL，就认为单元为空单元，其中 VOFL 为 VOF 水平对流算法中的下限值。默认情况下，VOFL 和 VOFU 都设置为 1×10^{-5}。

可用下列方法设容差：

命令：FLDATA35,VFTOL,Label,Value

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Setup | VOF Environment | VFRC Tolerance，弹出图 10-11 所示的 VOF 分析中 VFRC 容差设置面板，该面板包括三种选项：设置 VOF 对流容差（VOF advection）的上、下限容差，设置层流的容差的上、下限容差，设置湍流容差的上、下限容差。

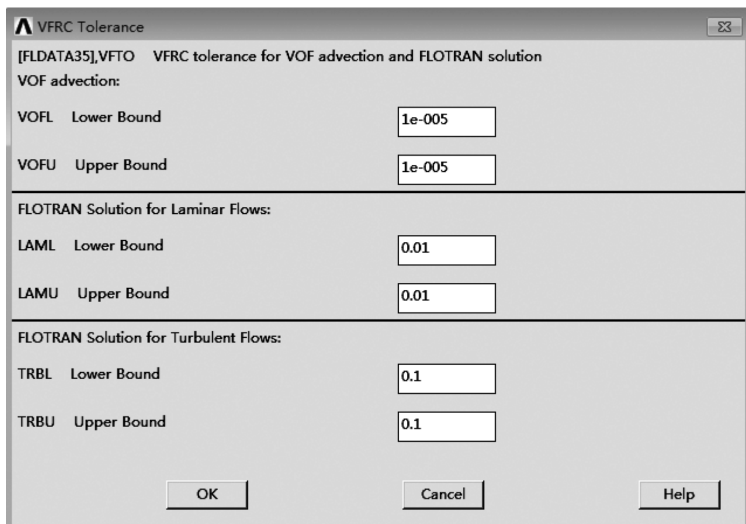


图 10-11 VOF 分析中 VFRC 容差设置面板

在常规 FLOTRAN 求解中，与一个完整单元相邻的一个空的单元在局部缩放网格中发生了急剧的变化，这使刚度矩阵变得更加病态，并严重影响期望的质量。为了避免出现这种情况，对于那些 VFRC 值小于或等于层流的 LAML 和湍流的 TRBL 的单元，FLOTRAN 引用了另外一个公差组合成有限元方程，其中 LAML 和 TRBL 分别为层流和湍流的下偏差。类似地，当组合有限元方程时，VFRC 值大于或等于层流的 1−LAMU 和湍流的 1−TRBU 的单元则认为是完整单元。

这些公差中的任何一个都可以设置。默认情况下，LAML 和 LAMU 可设为 1×10^{-2}，TRBL 和 TRBU 设为 1×10^{-1}。

3．VOF 时间步

因为 CLEAR-VOF 算法在时间上为显示算法，对于 VOF 对流算法必须使用一个时间步，这相当于一个小于 1 的 CFL 数。在另一方面，由于 FLOTRAN 瞬态求解算法在时间上是隐式的，并且时间步大小上没有稳定性限制，因此基于 VOF 约束上选择时间步有时可能会非常受限制。相应地，FLOTRAN 每一求解步采用多重 VOF 对流步。VOF 对流时间步可设为等于通过指定一个参数划分的求解时间步。如果 VOF 对流时间步仍然很大，FLOTRAN

就会把 VOF 时间步自动减半。VOF 时间步自动减小会持续直到 VOF 对流计算过程中 VFRC 场的局部不平衡性小于 COFL 容差。通过消除一些时间步的检查。一个良好的参数估计会使计算效率更高。



可用下列方法设置时间步：

命令：FLDATA4,TIME,NTVF,Value

GUI: Main Menu | Solution | FLOTRAN Setup | VOF Environment | Time Stepping

对于 VOF 分析，密度是常数。因此质量守恒相当于总流体体积（或二维下的面积）守恒。理想情况下，进入问题区域和流出问题区域的体积之差应等于区域内总体积的增加或减小，然而在实际有限元分析中，用 Galerkin 弱结构表示满足连续性。因此，一般每个单元都有一个较小的质量不平衡。

局部质量失衡通常与离散误差相似，而相似误差为 VOF 分析中所引用的局部 VFRC 不平衡性的一个主要来源。尽管与总体体积相比，这个不平衡可能会非常小，但是它会随着时间步的增加成指数积累。因此，在每个 VOF 时间步上 FLOTRAN 对 VFRC 值进行局部调整，通过按比例地增加或减小部分充满流体单元以保证局部的 VFRC 平衡。在 Jobname.pfl 文件中列出了最终的 VFRC 不平衡值。

10.5.4 后处理

体积组分在结果文件单元数据部分作为不可求和的其他记录。如果查看体积组成，可以使用下列命令：

命令：PLESOL,NMISC,1

因为体积组分是必须以单位为基础的参数，它不连续地穿过单元。如果希望见到光滑和连续的体积组合变化，首先应该将结果存入单元表，使用以下命令：

命令：ETABLE,VFRC,NMISC,1

GUI：Main Menu | General Postproc | Element Table | Define Table

然后，用户可以使用下列方法画出平均的结果：

命令：PLETAB,VFRC,1

GUI：Main Menu | General Postproc | Element Table | Plot Elem Table

然而，不用之前的命令，也可以使用下列命令：

命令：PLVFRC,CONT

GUI：Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Element Solu

10.6 多组分传输分析

10.6.1 理论基础

如果用户激活了多组分选项，则可以同时跟踪具有不同属性的不同流体的流动状态。使用单一动量方程求解流体流动场。对于密度，如果用户使用复合气体选项或复合混合物选项，则可以根据指定流体和它们的质量分数计算动量方程中流体属性参数。CGAS 选项仅支持密度，但是 CMIX 可以应用到密度、粘度或导热系数中。



组分传送的控制方程对于每一种组分是质量平衡方程：

对于 $i=1$, … , $n-1$（n 为组分的数量）

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t}+\nabla(\rho Y_i\vec{v})-\nabla(\rho D_{mi}\nabla Y_i)=0 \tag{10-2}$$

式中，Y_i 为第 i 种组分的质量分数；ρ 为体积密度（mass/length3）；$\vec{v}$ 为速度矢量（length/time）；D_{mi} 为质量扩散系数（length^2/time）

对于第 n 种组分方程不直接被求解，而由用户选择作为“代数种类”。从下式中在每个节点计算第 n 种组分的质量分数

$$Y_n=1-\sum_{i=1}^{n-1}Y_i \tag{10-3}$$

对于多组分问题，施密特数与质量扩散系数具有以下关系

$$Sc_i=\frac{\mu}{\rho D_{mi}} \tag{10-4}$$

在湍流分析中，需要添加一个额外项

$$\nabla\left(\frac{\mu}{Sc_i}\nabla Y_i\right)\to\nabla\left(\left(\frac{\mu}{Sc_i}+\frac{\mu_t}{Sc_{ti}}\right)\nabla Y_i\right) \tag{10-5}$$

式中，μ_t 为湍流粘度（turbulent viscosity）；Sc_{ti} 为湍流中的施密特数。

10.6.2 多组分传输分析步骤

多组分传输的分析步骤中的选择单元、建立模型和划分网格与其他类型分析基本一样，区别主要在于进行 FLOTRAN 的设置，FLOTRAN 中有一个专门的多组分传输分析模块。用户可以使用下列方法打开：

GUI：Main Menu | Preprocessor | FLOTRAN Set Up | Multiple Species，下面将为用户详细介绍这一模块的使用。

1．建立流体组分

打开多组分传输模块后，弹出图 10-12 所示的多组分基本设置面板，该面板包括三个选项：定义组分的数量（Number of species），程序最多支持 6 种不同的组分，用户根据需要进行输入；代数组分数（Algebraic species number），程序的默认值为 2；通用气体常数（Universal gas constant），国际单位下的取值为 8314.29。

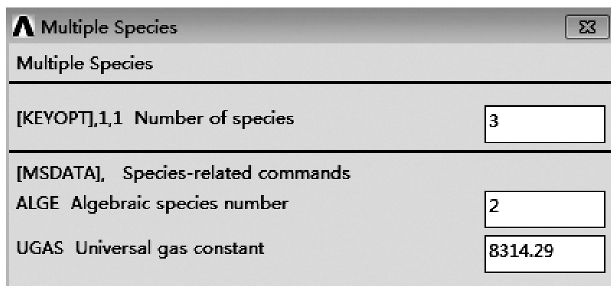


图 10-12　多组分基本设置面板

2．设置多组分

单击图 10-12 中的 OK 按钮，弹出图 10-13 所示的多组分求解设置面板，该面板包括组分数和每一种组分的设置选项，其中组分数与图 10-12 中的设置组分数相一致，在这里取 3 种组分，每一种组分包括：通用、求解、松弛、惯性松弛、气体属性参数、限制值、求解容差、对流、质量矩阵形式。下面给用户详细介绍每一类的设置。

（1）通用

用户选择需要的一种组分，比如选择组分 1（Species #1），然后选择通用选项，单击 OK 按钮，则弹出图 10-14 所示的通用选项设置面板，该面板上包括六个选项：设置组分名称（Species name），用户可以根据需要进行设置组分名称；设置组分的分子量（Molecular weight），用户根据需要输入相应的分子量；设置组分的施密特数（Schmidt number）；为扩散项设置积分算法（Quad order for diffusion），用户可以输入 0、1 或 2，数字 0 表示为单点积分，数字 1 除了使用温度分布来计算和温度相关的气体属性外与数字 0 没有区别，数字 2 表示为两点积分，这是轴对称模型的默认选项；为源项设置积分算法（Quad order for SRC term），用户可以输入 0、1 或 2，数字 0 表示为单点积分，数字 1 除了使用温度分布来计算和温度相关的气体属性外与数字 0 没有区别，数字 2 表示为两点积分，这是轴对称模型的默认选项。

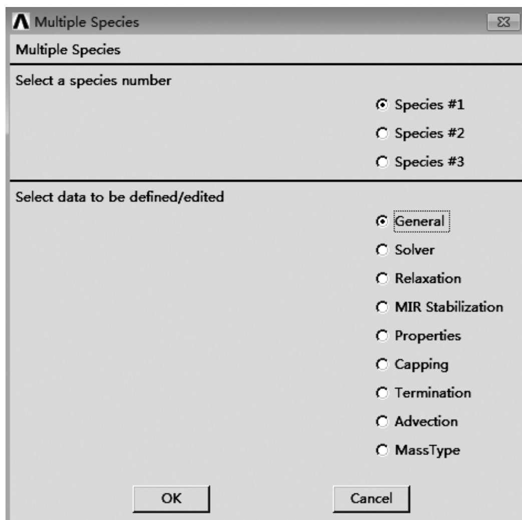


图 10-13 多组分求解设置面板

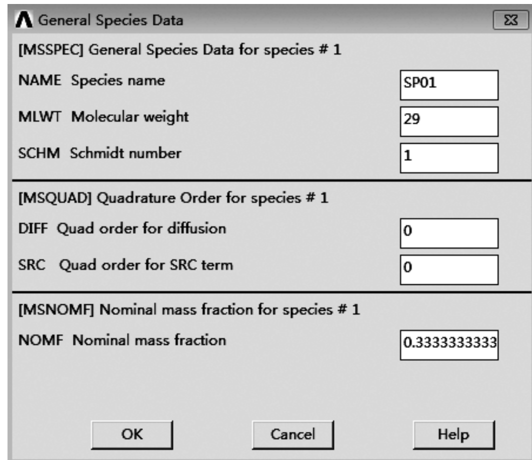


图 10-14 通用选项设置面板

（2）求解器

用户选择需要的一种组分，比如选择组分 1（Species #1），然后选择求解器选项，单击 OK 按钮，则弹出图 10-15 所示的多组分求解器设置面板，该面板上包括 TDMA、Conj residual、Precond conj res、PGMR、Sparse Direct 和 PBCGM 六类求解器，用户根据需要进行选择。

（3）松弛因子

用户选择需要的一种组分，比如选择组分 1（Species #1），然后选择松弛选项，单击 OK 按钮，则弹出图 10-16 所示的多组分松弛系数设置面板，该面板包括四个选项：设置组

分浓度舒张系数的松弛因子（Concentration relaxation），程序的默认值为 0.5；设置组分质量扩散系数的松弛因子（Mass diff. relaxation），程序的默认值为 0.5；设置组分的有效质量扩散系数的松弛因子（Eff mass diff. relaxation），程序的默认值为 0.5；为传输方程设置惯性松弛因子（Inertial relaxstion），程序的默认值为 1E20。

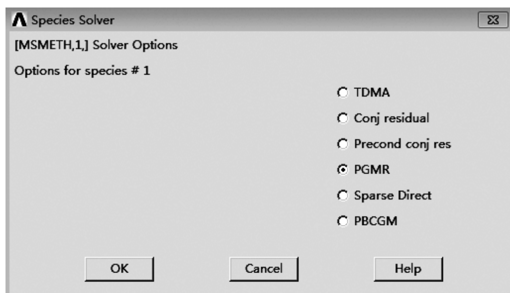


图 10-15　多组分求解器设置面板

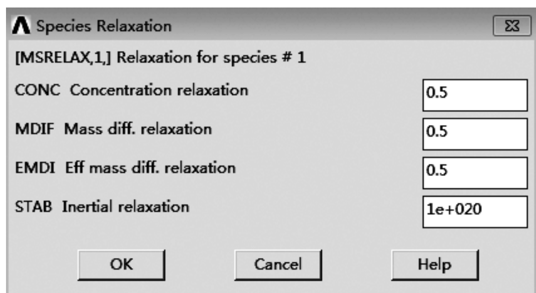


图 10-16　多组分松弛系数设置面板

（4）修正惯性松弛因子

用户选择需要的一种组分，比如选择组分 1（Species #1），然后选择 MIR Stabilization 选项，单击 OK 按钮，则弹出图 10-17 所示的多组分修正惯性松弛系数设置面板，该面板只有一个选项，用户可以根据需要输入修正的惯性松弛系数，程序的默认值为 0，即关闭修正惯性松弛，该系数必须为正值，建议用户输入 0.1～1 的值。

（5）属性

用户选择需要的一种组分，比如选择组分 1（Species #1），然后选择 Properties 选项，单击 OK 按钮，则弹出图 10-18 所示的多组分属性参数设置面板，该面板包括密度（Density）、粘度（Viscosity）、导热系数（Conductivity）、比热（Specific Heat）和质量扩散系数（Mass Diffusion）五种材料属性参数。这五种属性参数的设置方法相同，本书仅以设置密度为例给用户加以介绍，选择多组分属性设置面板上的 Density 选项，单击 OK 按钮，弹出图 10-19 所示的组分密度设置面板，该面板包括六个选项：密度类型（Density type），程序支持常数（CONSTANT）、气体（GAS）和液体（LIQUID），用户需要手动进行输入；名义值（Nominal type）；第一系数（First coefficient）；第二系数（Second coefficient）；第三系数（Third coefficient）；是否激活密度可变（Vary density？）。对于名义值、第一系数、第二系数和第三系数的使用，用户可以参考本书第 6 章相关内容。

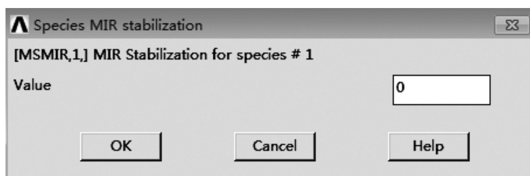


图 10-17　多组分修正惯性松弛系数设置面板

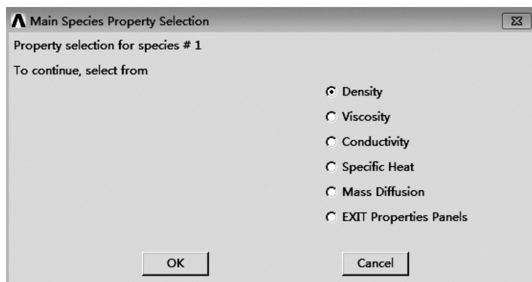


图 10-18　多组分属性设置面板

（6）设置组分限制值

用户选择需要的一种组分，比如选择组分 1（Species #1），然后选择 Capping 选项，单击 OK 按钮，则弹出图 10-20 所示的组分限制值设置面板，对于多组分问题，为了保证组分传输过程中的质量守恒，因此只限制质量分数的值，该面板包括三个选项：是否激活质量分数限制值（Cap mass fraction？）、质量分数的上限值（Upper bound）和质量分数的下限值（Lower bound）。



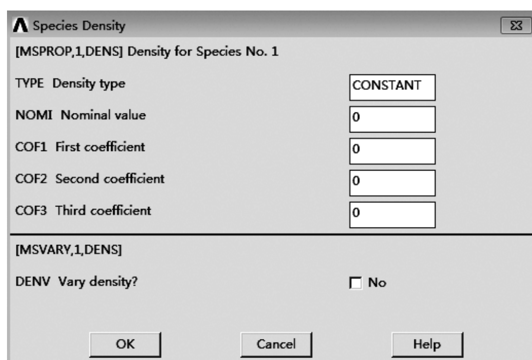


图 10-19 组分密度设置面板

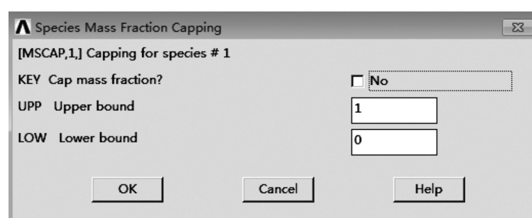


图 10-20 组分限制值设置面板

（7）设置多组分收敛容差

用户选择需要的一种组分，比如选择组分 1（Species #1），然后选择 Termination 选项，单击 OK 按钮，则弹出图 10-21 所示的多组分传输收敛容差设置面板，该面板只有一个收敛容差设置选项，对于稳态多组分传输问题的默认值为 1×10^{-8}，而瞬态多组分传输问题的默认值为 1×10^{-6}。

（8）设置多组分对流选项

用户选择需要的一种组分，比如选择组分 1（Species #1），然后选择 Advection 选项，单击 OK 按钮，则弹出图 10-22 所示的多组分传输对流选项设置面板，该面板包括三个选项：MSU、SUPG 和 COLG，用户根据需要进行选择。

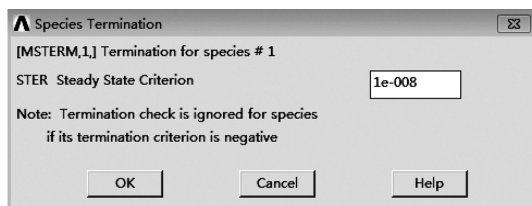


图 10-21 多组分传输收敛容差设置面板

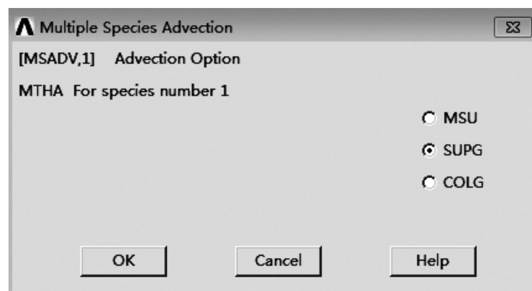


图 10-22 多组分传输对流选项设置面板

（9）设置多组分瞬态计算时的质量矩阵类型

用户选择需要的一种组分，比如选择组分 1（Species #1），然后选择 Mass Type 选项，单击 OK 按钮，则弹出图 10-23 所示的多组分传输对瞬态计算质量矩阵类型设置面板，该面

板包括两个选项：集中质量矩阵（LUMP）和一致质量矩阵（COLG），用户根据需要进行选择。

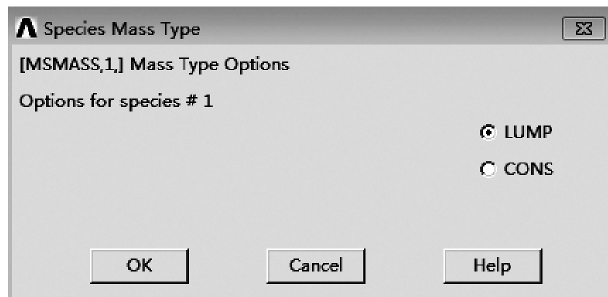


图 10-23　多组分传输对瞬态计算质量矩阵类型设置面板

3．激活多组分选项

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up，弹出图 10-1 所示的求解选项设置面板，选择面板上的 SPEC 选项，激活多组分传输功能。

4．设置多组分气体属性参数

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Fluid Properties，弹出图 10-24 所示的多组分属性设置面板，选择密度、粘度、导热系数和比热容的类型都为 CMIX，单击 OK 按钮，关于多组分流体属性理论，用户可以参考第 6 章相关内容。

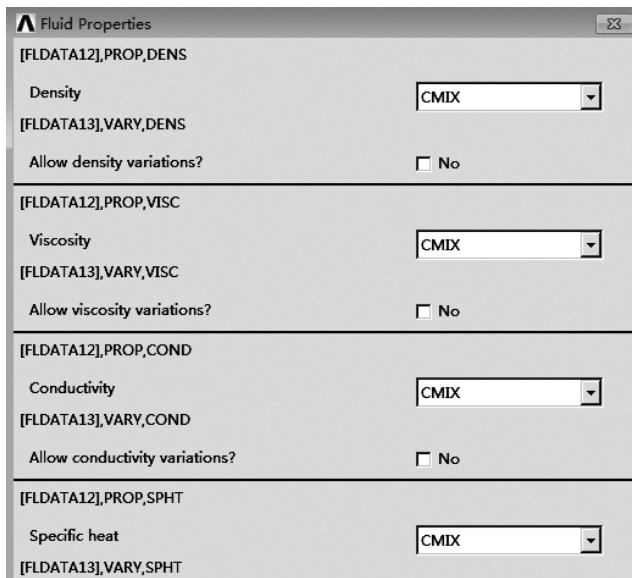


图 10-24　多组分属性参数设置面板

5．求解

GUI：Main Menu | Solution | Solve | Current LS

第 11 章 FLOTRAN 流-固耦合分析



ANSYS 软件的一个特点就是具有强大的多场耦合功能，包含流-固、流-固-热和流-热耦合分析功能。ANSYS 提供了两种方法实现，一种方法是基于单代码多场求解器（MFS-Single Code），另一种方法为物理环境多场求解法（Physics），下面将给读者作详细介绍。

11.1 单代码多场求解器

用户可以使用单代码多场求解器完成多种场载荷的耦合求解，包括电磁场与结构耦合，电磁场和热场耦合等，本书重点讲解基于单代码多场求解器进行流-固耦合分析的方法。单代码多场求解器使用迭代耦合求解器，顺序求解每一个物理场，分别求解每一个矩阵方程。求解器在每一个物理场之间迭代计算，直到跨越物理界面传递的载荷收敛。

11.1.1 创建需要求解的场模型

基于单代码多场求解器进行流-固耦合分析时，首先要在 ANSYS 中建立场模型。用户可以根据需要任意建立这些模型，但有一个要求就是这些模型必须具有相同的几何形状。用户可以在一个 ANSYS 数据库中创建，也可以在不同的数据库中创建，并导入这些模型来建立模型。每一个模型都包括求解某一特定场需要的所有信息，包括网格、边界条件、分析选项和输出选项等。

11.1.2 创建不同场之间的界面条件

为了在不同场之间的界面上实现载荷传递，用户需要创建不同场之间的界面条件。具有共同表面界面编号的标记表面会交换面载荷数据，具有共同体积界面编号的标记体积会交换体载荷数据。

对于场间的面载荷传递，用户可以使用 SF，SFA，SFE 或 SFL 和面载荷标记。用户可以使用下列方式激活面载荷标记：

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Field Surface Intr | On Lines/On Areas/On Nodes/On Elements，弹出拾取对话框，用户根据选择的实体类型进行选择，然后单击 OK 按钮，弹出图 11-1 所示的在场间面设置标记号面板。用户需要进行两次场表面标记，一次是对于发生载荷传递的每一个场表面。当和 FSIN 标记一起执行 SF，SFA，SFE 和 SFL 命令时，场界面都使用相同的界面编号，在具有相同界面编号的场间发生载荷传递。对于跨越每一对场表面界面的载荷传递也保持唯一的界面编号。为了设定面载荷传递选项，可以通过 MFSURFACE 命令使用这些界面编号。

用户可以使用下列方式激活体载荷标记：

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Field Volume Intr | On Element，弹

出拾取对话框，用户根据选择的实体类型进行选择，然后单击 OK 按钮，弹出图 11-2 所示的在场间体设置标记号面板。对于体载荷传递，用户使用 BFE 命令以及 FVIN 体载荷标记。两次应用场体积界面标记，一次是对于发生载荷传递的每一个场体积。当和 FVIN 标记一起执行 BFE 命令时，发生载荷传递的场界面都使用相同的界面编号，在具有相同界面编号的场间发生载荷传递。对于跨越每一对场体积界面的载荷传递也保持唯一的界面编号。为了设定体载荷传递选项，可以通过 MFVOLUME 命令使用这些界面编号。

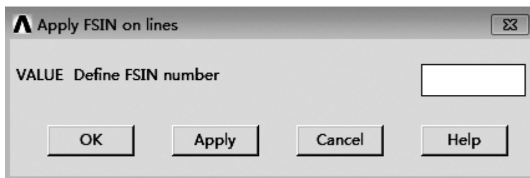


图 11-1 在场间面设置标记号面板

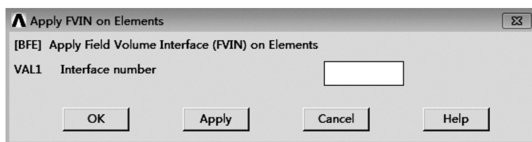


图 11-2 在场间体设置标记号面板

11.1.3 设置单代码多场求解器

1．激活单代码多场求解器

用户可以使用下来方式激活单代码多场求解器：

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | Select method，弹出图 11-3 所示的多场耦合求解器激活面板，选择 ON，单击 OK 按钮，弹出图 11-4 所示的多场耦合求解设置面板，选择 MFS-Single Code，单击 OK 按钮。

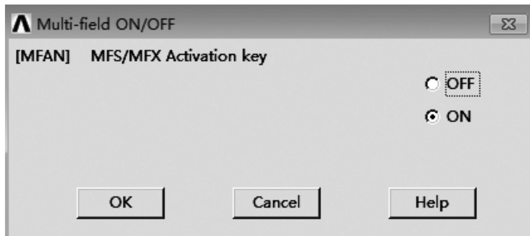


图 11-3 多场耦合求解器激活面板

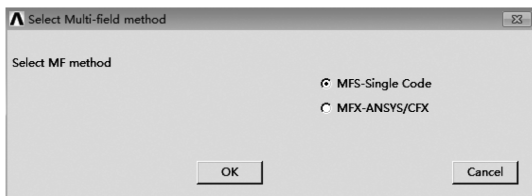


图 11-4 多场耦合求解方法设置面板

2．定义不同的场

用户可以使用 MFELEM 命令定义场，也可以使用下来方式定义场：

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Define | Define，弹出图 11-5 所示的 MFS 定义场设置面板，该面板包括三个选项：文件号（Field number），程序会使用该号进行内部的载荷传递，建议用户从 1 开始设置，依此类推；单元类型（Element type），用户可以选择单元类型中一个或多个组成一个场；场文件名（Filed file name），该文件名会作为 ANSYS 计算中存储计算相关数据的文件名标示。用户若定义了 10 个以上的单元类型，则使用 MFEM 命令将更多单元类型添加到场中，用户也可以使用下列方式添加单元：

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Define | Add elems，弹出图 11-6 所示的 MFS 添加单元设置面板，用户可以根据需要进行添加单元。

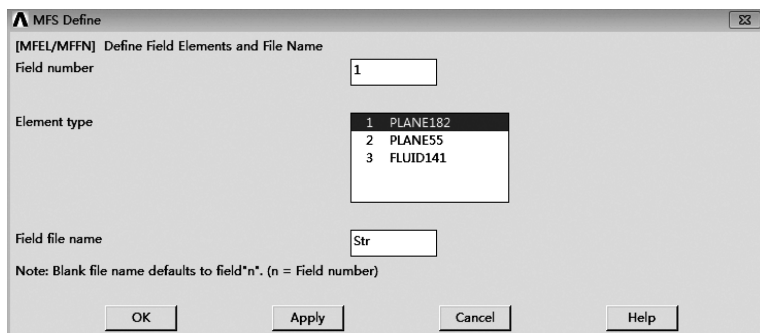


图 11-5 MFS 定义场设置面板

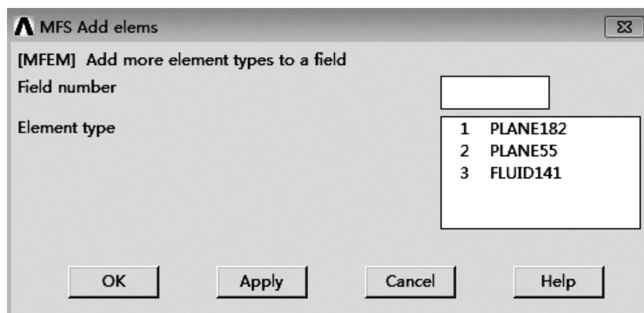


图 11-6 MFS 添加单元设置面板

3．定义捕捉场

对于每个场分析，MFS 分析允许确定不同的求解选项，使用捕捉场选项捕捉每个场编号的求解选项。求解选项会写到一个文件中，当对场进行求解时会读入求解选项。在设置新场的选项之前，执行 MFCLEAR,SOLU 命令清除所有现存的求解选项。MFCLEAR,SOLU 命令将所有求解选项设置成 ANSYS 的默认值。通过对分析选项、非线性选项、载荷步选项等执行 ANSYS 求解命令来设定每个场分析的求解选项。求解选项会写入到一个指定的给定场编号的文件中。命令文件名默认场为“n”，其中，n 为场编号。用户可以使用下列方式激活捕获场选项：

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Capture，弹出图 11-7 所示的 MFS 求解捕获场设置面板，该面板包括三个选项：场号（Field number）、命令文件名（Commands file name）和文件名扩展名（Commands file ext）。

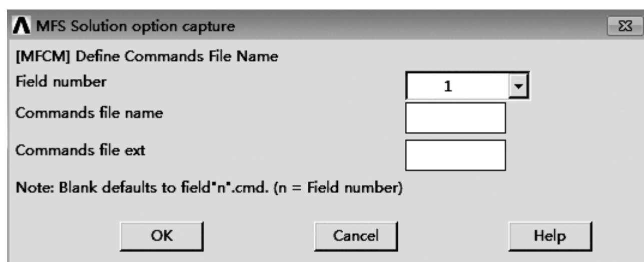


图 11-7 MFS 求解捕获场设置面板

4．设置多场求解

（1）总体设置多场求解

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Setup | Global，弹出图 11−8 所示的多场求解总体设置面板。

MFS Setup
Multi-field Solution Global Options
[MFIN] Load transfer option
Profile Preserving
Global Conservative
[MFBU] Bucket search option
ON
OFF
Scaling factor (in percent) 50
[MFTO] Normal tolerance for MFSU
OFF
ON
Tolerance for normal distance 1e-006
Normal distance type
Relative
Absolute

图 11−8　多场求解总体设置面板

该面板包括三个选项：

1）载荷传递选项（Load transfer option）。用户使用该选项可以将场界面之间的载荷传递设定为总体守恒（Global Conservative）和图形保留插值（Profile Preserving）。总体守恒或图形保留插值可应用力、热通量和场界面间传递的热生成。图形保留插值传递力、热通量和作为通量数量的通过场界面热生成，整体守恒插值传递诸如力和热率等的变量，默认选项为图形保留插值。

2）桶式搜索选项（Bucket search option）。使用该选项可以更有效地映射界面数据，这个选项将界面分割成许多小单元，用户可以为搜索算法定义一个比例系数，默认值为 50%，桶的数量等于比例系数乘以搜索界面上的单元数。该选项默认为激活状态。

3）名义容差（Normal tolerance）。用户可以为多场求解设置名义容差，该选项默认为关闭状态，用户可以选择 ON 进行激活，并可以设置相应的容差。

（2）设置多场求解顺序

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Setup | Orde，弹出图 11−9 所示的多场求解顺序设置面板，用户可以通过该面板设置从第一个场求解到最后一个场求解的场求解顺序。

（3）设置多场求解外部场选项

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Setup | Externa，弹出图 11−10 所示的多场求解顺序设置面板。外部场预定义了载荷，它的存在只是为了将载荷传递到另一个场中。外部场需要完全确定的载荷，且在 MFS 分析过程中并不进行求解，它只是将载荷传递到另一个场。外部场功能使用一个由外部软件代码产生的简单的传递机理，而外部软件代码可以支持写出一个由节点、单元和载荷组成的 CDB 文件。

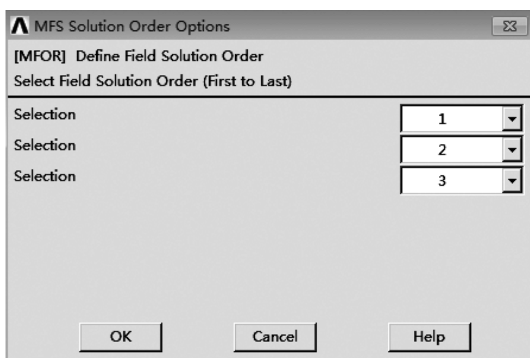


图 11-9 多场求解顺序设置面板

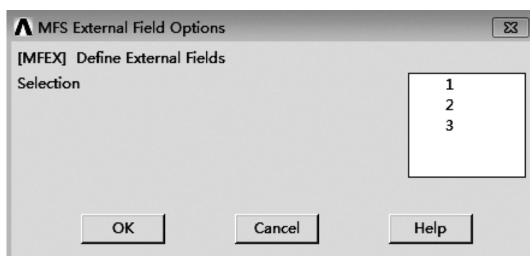


图 11-10 多场求解顺序设置面板

5．设置多场界面载荷传递

MFS 分析允许用户在编辑的表面界面和体积界面间进行载荷传递。用户可以使用下列方式设置面界面之间的载荷传递：

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Interface | Surface，弹出图 11-11 所示的 MFS 面界面载荷传递选项设置面板。

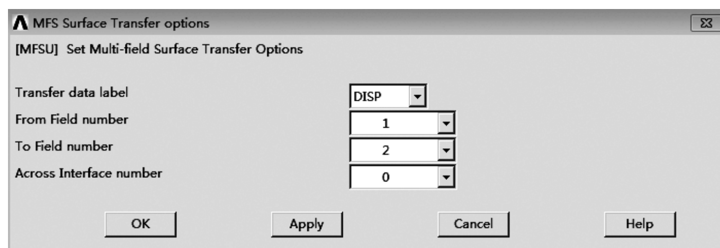


图 11-11 MFS 面界面载荷传递选项设置面板

该面板包括四个选项：传递载荷类型选项（Transfer data label），通过该选项用户可以选择传递载荷的类型，如位移（DISP）、力（FORC）和温度（TEMP）等；发送载荷的场号（From Field number），用户根据需要进行选择；接收载荷的场号（To Field number）；完成不同场之间传递载荷的界面号（Across Interface number）。用户可以使用下列方式设置体界面之间的载荷传递：

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Interface | Volume，弹出图 11-12 所示的 MFS 体界面载荷传递选项设置面板。

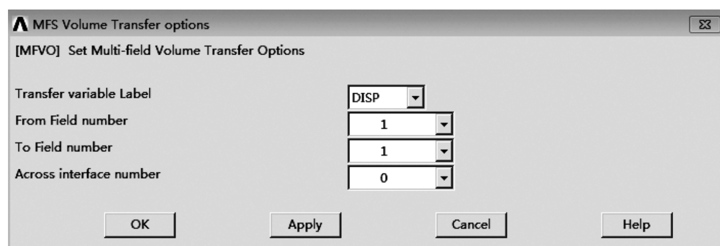


图 11-12 MFS 体界面载荷传递选项设置面板

6．设置多场求解策略

（1）设置耦合求解迭代次数

用户可以使用下列方法设置耦合求解迭代次数：

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Stagger | Iterations，弹出图 11-13 所示的 MFS 耦合求解迭代计算设置面板，该面板包括三个选项：设置耦合场之间最大的交错迭代次数（Maximum Stagger Iteration），设置耦合场之间最小的交错迭代次数（Minimum Stagger Ineration）和设置耦合场之间的目标交错迭代次数（Target Stagger Inerations）。在每一个交错回路末端，耦合算法会检测通过界面传递的量的收敛情况。若界面量已经收敛，则分析会进入下一个时间步。交错求解会一直进行，直到达到最大的交错迭代次数，或者发生收敛为止。默认为 10 个交错迭代。

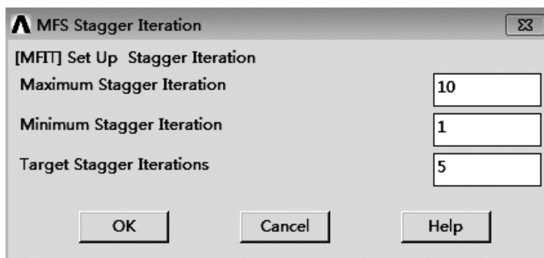


图 11-13　MFS 耦合求解迭代计算设置面板

（2）设置耦合求解收敛准则

用户可以使用下列方式设置耦合求解收敛准则：

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Stagger | Convergence，弹出图 11-14 所示的 MFS 收敛选项设置面板，用户可以选择面板中需要设置收敛的选项：所有项（ALL）、*X* 方向位移（DISP-UX）和 *Y* 方向位移（DISP-UY）等，然后单击 OK 按钮，弹出图 11-15 所示的设置收敛值面板，用户根据需要设置所选项目的收敛值，单击 OK 按钮。

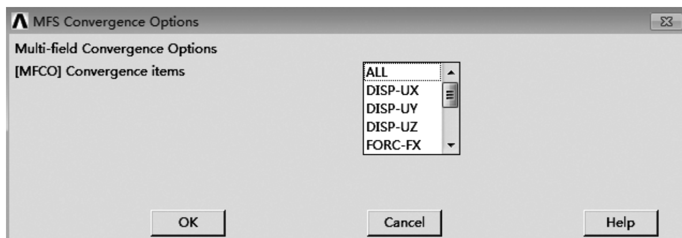


图 11-14　MFS 收敛选项设置面板

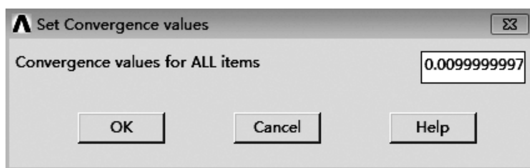


图 11-15　设置收敛值面板

（3）设置耦合求解松弛选项

用户可以使用下列方法设置松弛：

GUI：Main Menu｜Solution｜Multi-field Set Up｜MFS-Single Code｜Stagger｜Relaxation，弹出图 11-16 所示的 MFS 多场耦合求解松弛选项设置面板，用户可以选择面板中需要设置收敛的选项：所有项（ALL）、*X* 方向位移（DISP-UX）和 *Y* 方向位移（DISP-UY）等，然后单击 OK 按钮，弹出图 11-17 所示的为选定的项目设置松弛因子面板，该面板包括两种设置方法：RELX，为传递的载荷使用松弛因子；LINT，为传递的载荷使用线性插值方法。如果对 MFS 分析的每一个时间步长使用一个交错迭代，则对所有量使用一个松弛值 1.0。默认松弛值为 0.75。使用松弛设置选项，以便在耦合问题中得到一个最佳的收敛速率，尤其是需要动态松弛的情况。使用松弛选项后，在每一个多场交错求解中仅进行一次非线性交错迭代，通过多个多场交错使场求解器满足收敛。

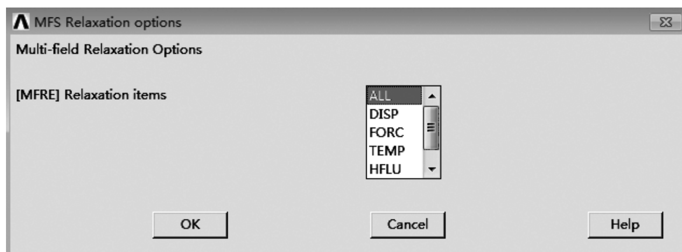


图 11-16　MFS 多场耦合求解松弛选项设置面板

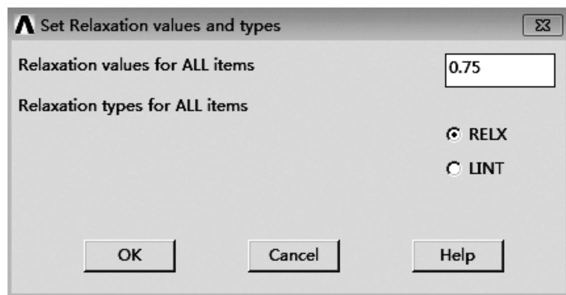


图 11-17　为选定的项目设置松弛因子面板

7．设置多场求解时间和频率控制

（1）设置多场求解时间控制

用户可以使用下列方式设置多场求解时间控制：

GUI：Main Menu｜Solution｜Multi-field Set Up｜MFS-Single Code｜Time Ctrl，弹出图 11-18 所示的 MFS 求解时间控制设置面板，该面板包括三个选项：多场求解终止时间（MFS End time），通过该选项用户可以设置多场求解终止时间；多场求解时间步（MFS Time step），通过该选项用户可以设置初始时间步（Intial Time step）、最小时间步（Minimum Time step）和最大时间步（Maximum Time step），此外，该选项还包括了一个 MFS 时间步获取关键字设置，默认设置为 OFF，即使用时间步作为下次重新求解时的开始时间步，ON 设置表示使用上一次求解完成时的最后时间作为下次重新求解时的开始时间步；MFS 重启动步选项

（MFS Restart step），通过该选项可以设置重启动分析的时间点，用户可以从最后一个时间步长开始，也可以从结果文件中最后一个收敛解开始重启动 MFS 分析，ANSYS 多场耦合求解允许单重和多重的重启动。

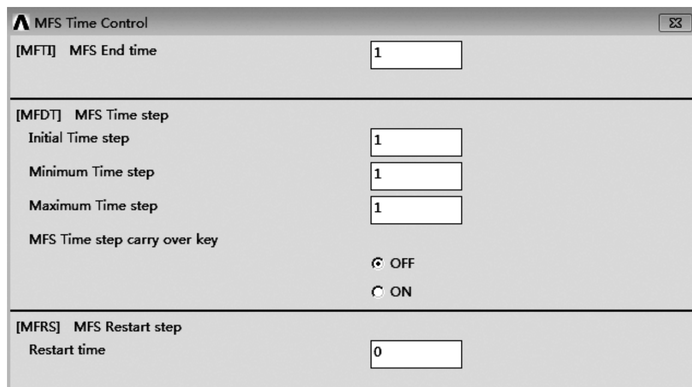


图 11-18　MFS 求解时间控制设置面板

（2）设置多场求解频率控制

用户可以使用下列方式设置多场求解频率控制：

GUI：Main Menu｜Solution｜Multi-field Set Up｜MFS-Single Code｜Frequenc，弹出图 11-19 所示的 MFS 求解的频率控制设置面板，该面板包括两个选项：场计算频率设置（Field calculation frequency），通过该选项可以设置控制求解频率的场号（Field number）和时间步频率（Time step frequency）；结果输出频率（Results output frequency），通过该选项用户可以设置求解结果的输出频率，该选项仅适用于谐响应分析或稳态分析。

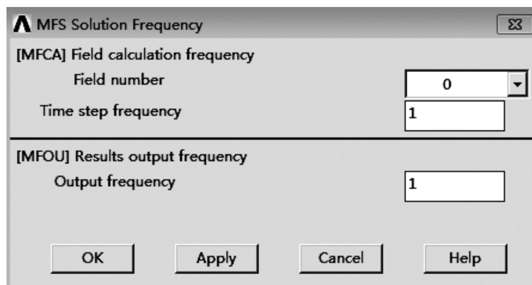


图 11-19　MFS 求解的频率控制设置面板

11.1.4 求解和后处理

1．求解

GUI：Main Menu｜Solution｜Solve｜Current LS，弹出求解状态对话框，单击 OK 按钮，开始求解。

2．后处理

为了对分析进行后处理，必须提供数据库，并且选择适当的结果文件。用户可以选择不同的结果数据库来观察结果。用户可以使用下来方式选择结果数据库：

GUI：Main Menu | General Postproc | Data&File Opts，弹出图 11-20 所示的数据和文件选项设置面板，用户单击…按钮，弹出图 11-21 所示的求解结果列表，用户可以选项一项进行观察。

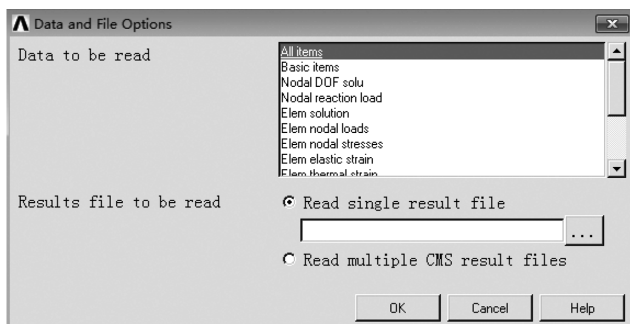


图 11-20 数据和文件选项设置面板

名称	修改日期	类型
struc2.rst	2012/11/17 9:05	RST 文件
therm1.rth	2012/11/17 9:05	RTH 文件

图 11-21 求解结果列表

11.2 基于物理环境求解多场

基于物理环境求解多场耦合问题的核心就是不同场之间的载荷传递。载荷传递耦合物理分析是指将多个相互作用的工程学科综合分析，求解一个实际的工程问题。为了方便起见，本书将一个特定的工程学科的求解分析过程称为一个物理分析。当一个物理分析的边界条件取决于其他分析的结果时，那么这些分析是耦合的。

有些情况仅使用单向耦合。例如，通过计算流场得到对一个水泥墙的压力载荷，再使用压力载荷进行水泥墙的结构分析。压力载荷造成墙的变形，理论上这种变形反过来又会影响墙附近的流场的状态。实际上流场的几何状态变化很小，可以忽略不计，因此就没有必要再返回来计算变形后的流场。在此分析中，流体单元用于求解流场，结构单元用于计算应力和变形。载荷耦合物理分析是指第一个物理分析的结果作为第二个物理分析的载荷，如果分析是完全耦合的，那么第二个物理分析的结果又会成为第一个物理分析的载荷。边界条件和载荷可分为两类：基本物理载荷，非其他物理分析的函数，这种载荷也称特征边界条件；耦合载荷，是其他物理分析的结果。

ANSYS 能够使用一个 ANSYS 数据库进行多物理耦合分析，使用同一个有限元模型。而这些单元所代表的物理意义在不同的物理分析中是不同的，这就用到物理环境的概念。

11.2.1 创建模型

1）已定义的每一个 ANSYS 实体模型的面或体都要与单元类型、材料属性和实常数有关的自己的特殊需要。所有实体模型都应该有单元类型编号、实常数组编号、材料编号以及

单元坐标系编号（这些编号会根据物理环境不同而不同）。

2）某组面或体将会用于两个或多个不同的物理环境。使用的网格必须满足所有的物理环境。

11.2.2 创建物理环境

对每一个物理环境都执行这一步，作为载荷传递耦合物理分析的一部分。

1）根据各分析手册中的内容确定每一个物理分析要设定的内容。

2）确定每个物理环境中要使用的必需的单元类型，如 FLOTRAN 中的 ET,1,141 或 ET,1,142 等。如果某个区域在某一个物理分析中不涉及，则设为零单元，如 ET,3,0，零单元在分析中将被忽略。

3）定义所需的材料属性、实场数组数据和单元坐标系，对应模型中分配的各项目编号。

4）使用 AATT 命令将单元类型、材料、实常数及单元坐标系的编号赋予实体模型的面或体。

5）施加名义载荷和边界条件。这些条件在此物理分析中的所有的迭代过程中是相同的（对于稳态问题）。

6）设定所有的求解选项。

7）为物理环境选择一个标题，执行 PHYSICS,WRITE 命令，对应的 GUI 操作如下：

GUI：Main Menu | Preprocessor | Physics | Environment | Write，弹出图 11-22 所示的写入物理环境文件设置面板，该面板包括四个选项：设置物理环境文件题目（Physics file tittle）、文件名（File）、文件扩展名（File extension）和目录（Directory）。

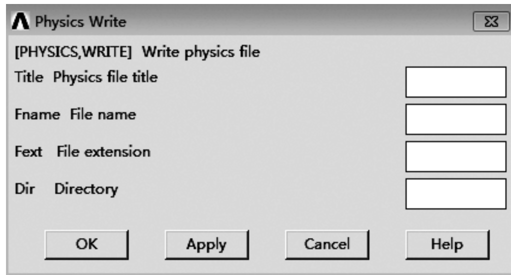


图 11-22 写入物理环境文件设置面板

8）清除目前的物理环境的数据，准备创建下一个物理环境，可以通过下列方式实现：

GUI：Main Menu | Preprocessor | Physics | Environment | Clear

9）按照以上步骤准备创建下一个物理环境。

10）执行 SAVE 命令保存数据库和物理环境文件指针。

假设这个多物理场分析的工作文件名为“Induct”，并写入了两个物理环境文件，这两个文件的文件名分别为 Induct.ph1 和 Induct.ph2。

11.2.3 执行载荷传递耦合物理场分析

执行载荷传递耦合物理场分析，以此进行流场分析和结构分析。

1．执行流场分析获得压力

（1）读入流场分析物理环境文件：

GUI：Main Menu | Preprocessor | Physics | Environment | Read，弹出图 11-23 所示的读入物理环境文件设置面板，该面板包括一个选项，即选择读入的物理环境文件。选择流场文件，单击 OK 按钮。

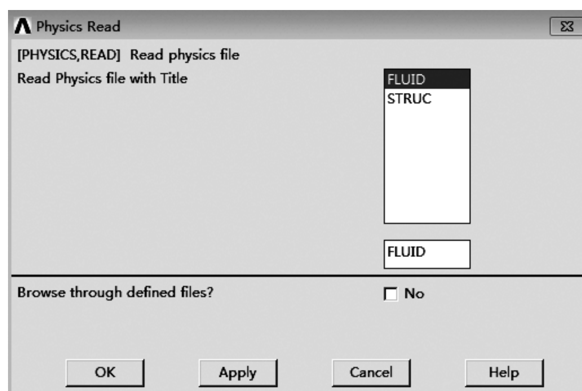


图 11-23　读入物理环境文件设置面板

（2）求解流场

GUI：Main Menu｜Solve｜Current LS

2．执行结构分析并读入压力

（1）读入结构分析物理环境文件：

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Physics｜Environment｜Read，弹出图 11-23 所示的读入物理环境文件设置面板，选择结构分析文件，单击 OK 按钮。

（2）读入流场分析中的压力

GUI：Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Structural｜Pressure｜From Fluid Analy，弹出图 11-24 所示的施加来自流场的压力设置面板，该面板包括四个选项：载荷步和子步号（Load step and substep no.）、时间点（Time-point）、面选项（Face Option）和结果文件名（Name of results file）。

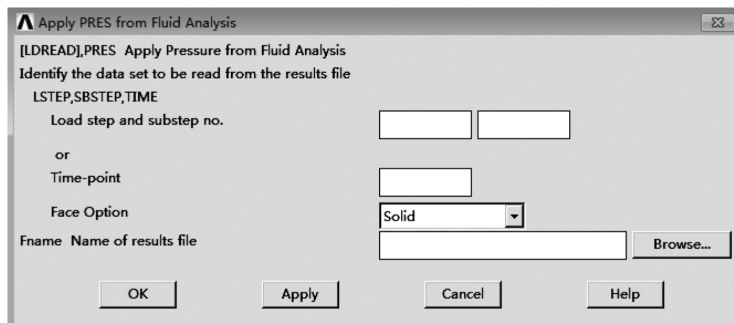


图 11-24　施加来自流场的压力设置面板

（3）求解结构场

GUI：Main Menu｜Solve｜Current LS

第 12 章　温差驱动流体流动分析

12.1　问题的描述

12.1.1　几何模型

该实例给用户介绍了模拟由于温差造成的流体流动问题的方法。图 12-1 所示为温差驱动流体流动分析模型，由图可知该模型的长为 1m，宽度为 0.3m，长方形的区域中充满了空气。该模型可以用来研究房间的通风和太阳能收集等问题。

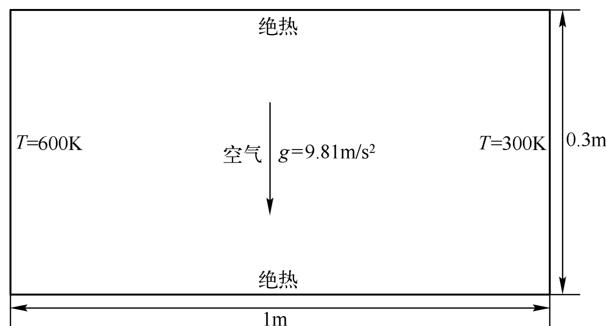


图 12-1　温差驱动流体流动分析模型

12.1.2　流体属性参数

该模型的流体为空气，由于温差造成空气流动，因此模型中的空气密度是变化的，假设初始密度为 1kg/m^3。此外，对于该问题需要同时考虑流体流动和能量交换，因此还需要空气的粘度、比热容和导热系数，但这三个量为常量，可选择使用流体属性中的 AIR-SI 选项。

12.1.3　选择单元

本实例选用二维流体单元 FLUID141 单元。

12.1.4　流体流动模型

该模型假设流体流动状态为湍流，由于模型中的空气存在旋转流动状态，因此选用 RNG 湍流模型。

12.1.5　边界条件及载荷

该模型的边界条件为热边界，即在模型的左侧温度为 600K，右侧温度为 300K，模型的

上、下边为绝热。模型的载荷为重力，即考虑重力加速度。模型的四边为无滑移边界条件，即 X 方向和 Y 方向的速度为 0。

12.2 GUI 操作

12.2.1 前处理

1．定义文件名

GUI：Utility Menu | File | Change Jobname，弹出一个对话框，在文本框中输入“Temperature difference driving”，单击 OK 按钮。

2．选择单元

GUI：Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击 Add 按钮，弹出图 12-2 所示的选择单元对话框，选择左侧中的 FLOTRAN CFD 项，然后在右边选择 2D FLOTRAN 141 项，单击 OK 按钮。

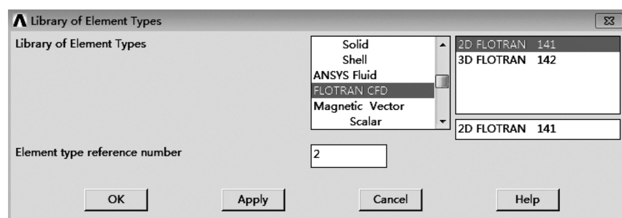


图 12-2　选择单元对话框

3．建立模型

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By Dimensions，弹出图 12-3 所示的通过尺寸创建矩形设置面板，设置 X1=0、X2=1、Y1=0 和 Y2=0.3，单击 OK 按钮。

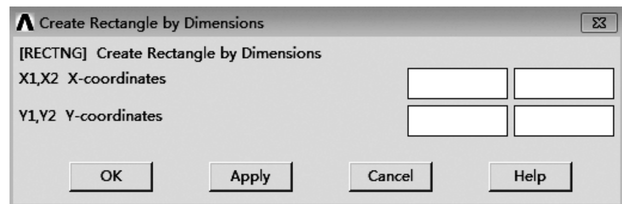


图 12-3　通过尺寸创建矩形设置面板

4．划分网格

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool

（2）设置总体网格尺寸

选择图 12-4 所示的网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设置（Set）按钮，弹出图 12-5 所示的总体网格尺寸设置面板。

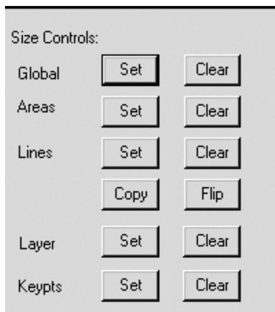


图 12-4 网格划分工具面板中尺寸控制子面板

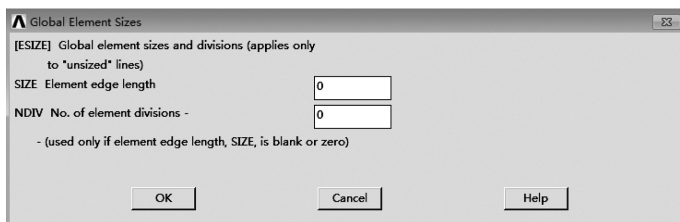


图 12-5 总体网格尺寸设置面板

该设置面板中存在两个控制选项，即单元尺寸控制（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸文本框中输入“0.01”，单击 OK 按钮。

（3）划分网格

选择网格划分工具面板上的网格划分（Mesh）按钮，弹出拾取对话框，拾取矩形，单击 OK 按钮。

12.2.2 求解

1．定义边界条件

（1）定义无滑移速度

1）选择模型外边界节点。

GUI：Utility Menu | Select | Entities，弹出图 12-6 所示的选择节点设置面板，设置选择的实体类型为 Nodes，选择方式为 Exterior，其他保持默认，单击 OK 按钮。

2）设置模型外边界节点的 X 方向和 Y 方向速度为 0。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Nodes，弹出拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出图 12-7 所示的在节点处施加速度设置面板，设置 VX=0、VY=0 和 VZ=0，单击 OK 按钮。

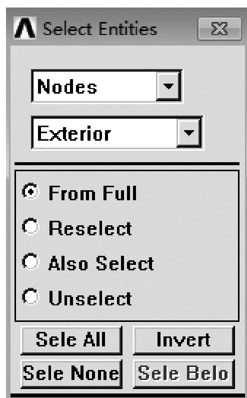


图 12-6 选择节点设置面板

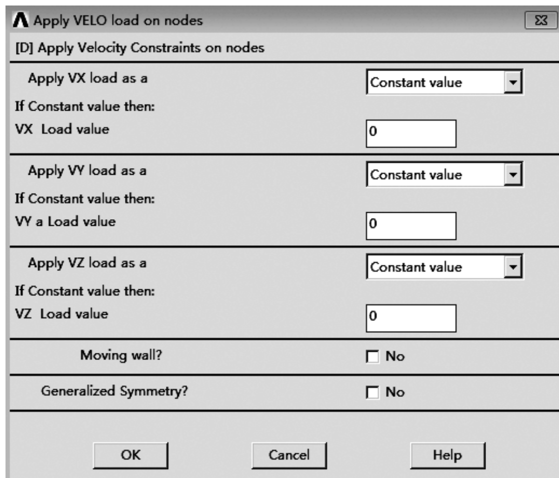


图 12-7 在节点处施加速度设置面板

（2）定义温度

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Thermal | Temperature | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L4，单击 OK 按钮，弹出图 12-8 所示的在线处施加温度设置面板。

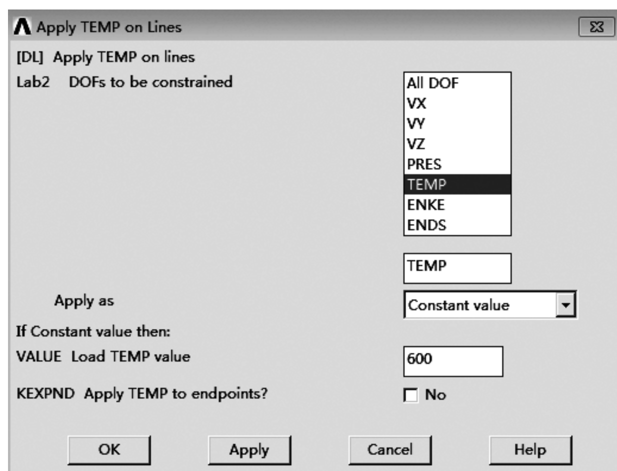


图 12-8 在线处施加温度设置面板

选择约束的自由度类型为温度（TEMP），约束值为 600，单击 Apply 按钮；继续拾取线 L2，单击 OK 按钮，弹出图 12-8 所示的在线处施加温度设置面板，选择约束类型为温度，约束值为 300，单击 OK 按钮。

2．设置流体求解选项

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Solution Options，弹出图 12-9 所示的流体求解选项设置面板，设置 TEMP 选项为 Thermal，即求解能量方程，考虑温度；设置 TURB 选项为 Turbulent，即流体流动状态为湍流，其他选项保持默认值，单击 OK 按钮。

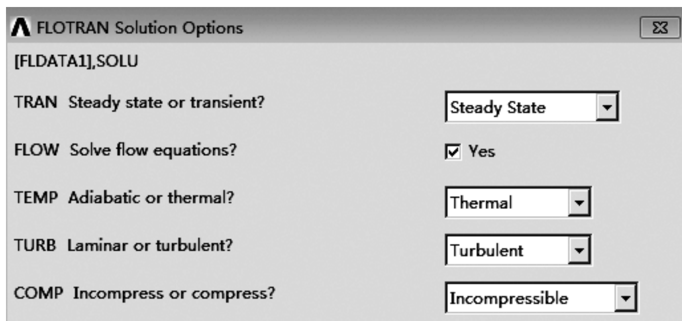


图 12-9 流体求解选项设置面板

3．设置流体求解控制

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Execution Ctrl，弹出图 12-10 所示的流体稳态求解控制设置面板，设置总体迭代次数为 20，其他选项保持默认设置，单击 OK 按钮。



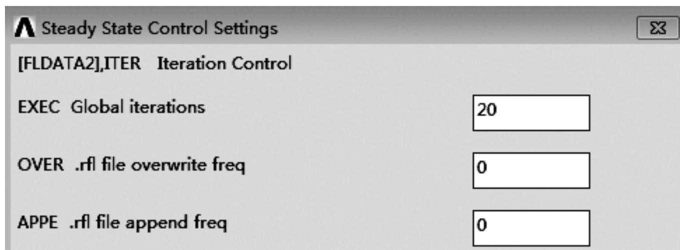

Steady State Control Settings
[FLDATA2],ITER Iteration Control
EXEC Global iterations 20
OVER .rfl file overwrite freq 0
APPE .rfl file append freq 0

图 12-10 流体稳态求解控制设置面板

4．设置计算结果输出

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Additional Out | RFL Out Derived，弹出图 12-11 所示的导出量输出控制面板，勾选面板上的所有选项，单击 OK 按钮。

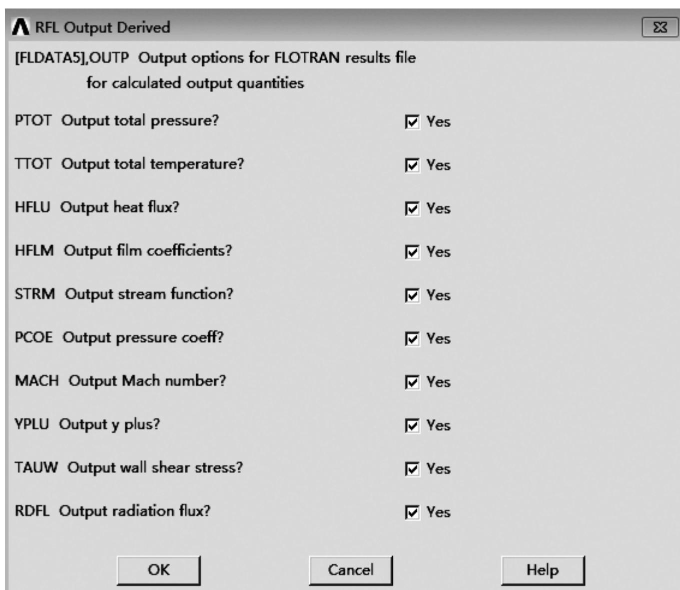

RFL Output Derived
[FLDATA5],OUTP Output options for FLOTRAN results file
for calculated output quantities
PTOT Output total pressure? Yes
TTOT Output total temperature? Yes
HFLU Output heat flux? Yes
HFLM Output film coefficients? Yes
STRM Output stream function? Yes
PCOE Output pressure coeff? Yes
MACH Output Mach number? Yes
YPLU Output y plus? Yes
TAUW Output wall shear stress? Yes
RDFL Output radiation flux? Yes
OK Cancel Help

图 12-11 导出量输出控制面板

5．设置流体属性参数

因为该模型需要同时求解流体流动和能量传递，因此需要输入流体的密度、粘度、比热容和导热系数。用户可以使用以下方式设置流体属性参数：

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Fluid Properties，弹出图 12-12 所示的流体属性参数设置面板，由于该实例的流体介质为空气，因此选择流体密度为 AIR-SI，并激活允许密度变化选项，设置流体粘度也为 AIR-SI，设置流体导热系数为 AIR-SI，设置流体比热容为 AIR-SI，单击 OK 按钮。

6．设置流体环境

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Flow Enviroement | Gravity，弹出图 12-13 所示的流体重力设置面板，因为考虑流体竖直向下的重力，因此输入 *Y* 方向加速度为 9.8，单击 OK 按钮。

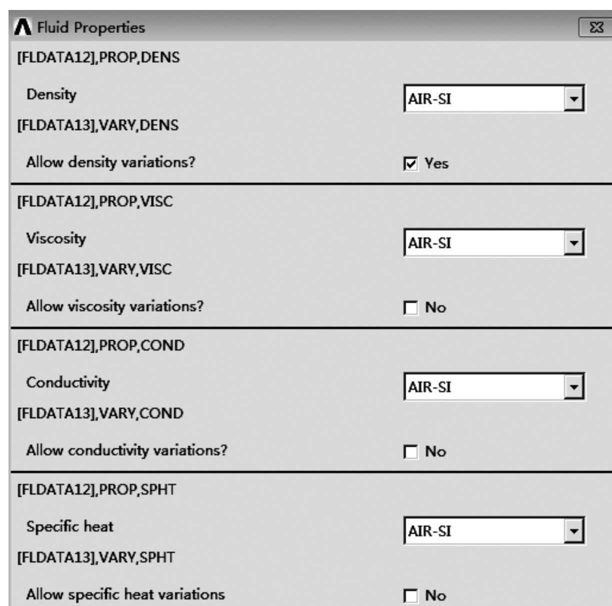


图 12-12　流体属性参数设置面板

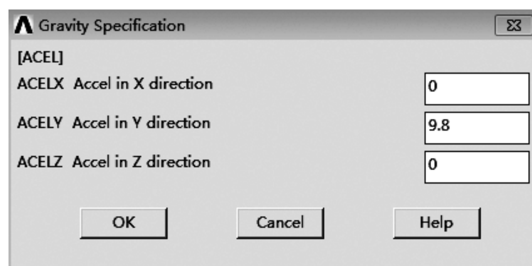


图 12-13　流体重力设置面板

7．设置流体湍流模型

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Turbulence | Turbulence Model，弹出图 12-14 所示的流体湍流模型设置面板，选择湍流模型为 RNG，单击 OK 按钮，弹出 RNG 湍流模型相应的计算参数设置面板，保持默认设置，单击 OK 按钮。

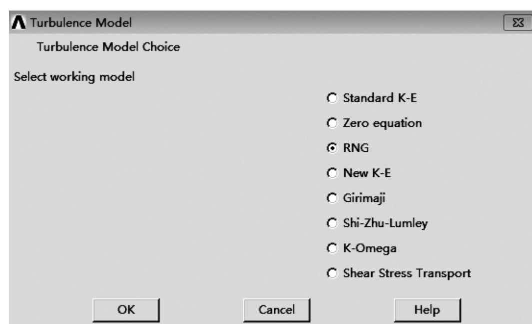


图 12-14　流体湍流模型设置面板

8．设置求解流体对流项算法

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Advection，弹出图 12-15 所示的流体对流项求解算法设置面板，设置动量方程、湍流方程、可压缩压力方程和能量方程的算法都为 SUPG。

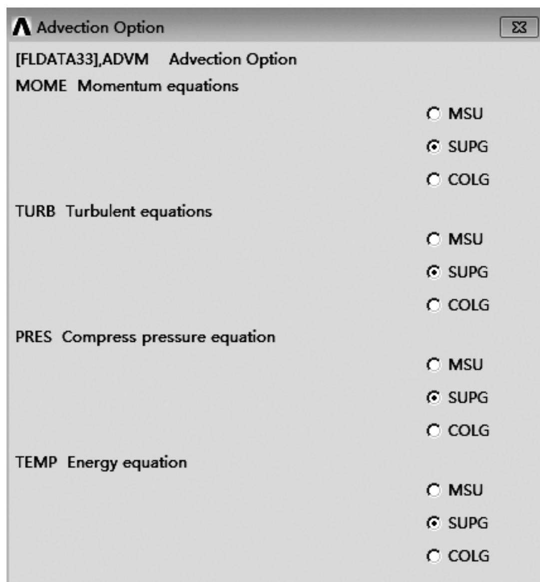


图 12-15　流体对流项求解算法设置面板

9．开始求解

GUI：Main Menu | Solution | Run FLOTRAN，开始求解。

12.2.3 后处理

图 12-16～图 12-21 所示分别为空气的速度、压力、温度、湍流动能、密度和速度矢量云图。由图可知，在两边温差和重力的作用下，空气的基本流动形式为旋转运动。

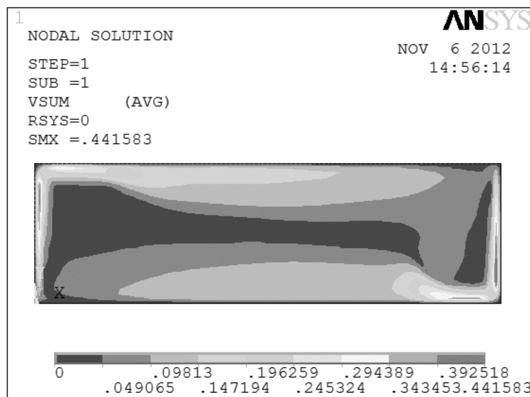


图 12-16　流体速度云图

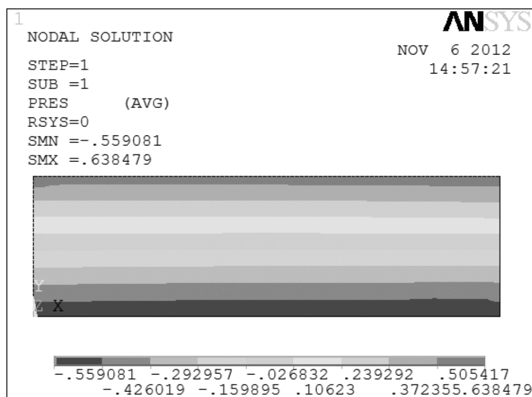


图 12-17　流体压力云图

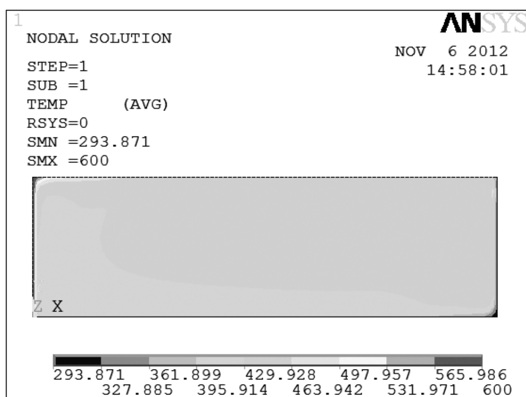


图 12-18 流体温度云图

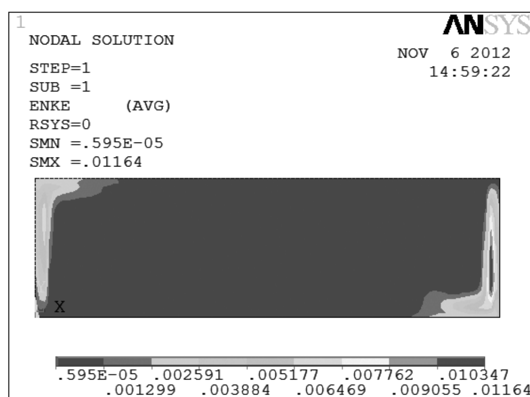


图 12-19 流体湍流动能云图

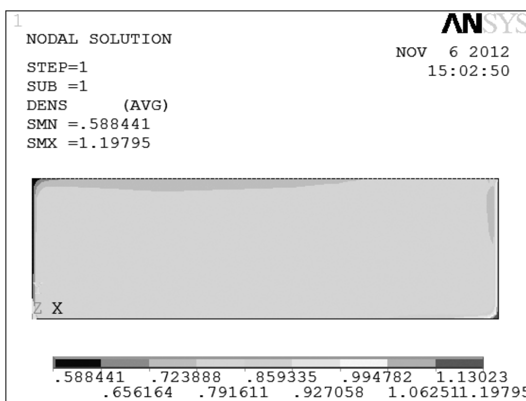


图 12-20 流体密度云图

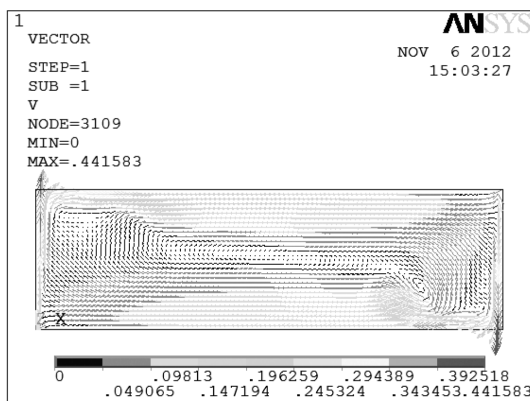


图 12-21 流体速度矢量云图

12.3 命令流

```
/FILNAME,Temperature difference driving,0
/PREP7
ET,1,141                !定义流体单元
rectng,0,1,0 ,0.3       !创建一个矩形
ESIZE,0.01
AMESH, all
!进入求解
/SOL
NSEL,S,EXT              !选择模型的外边界上的所有节点
!定义边界条件
D,ALL,VX,0
D,ALL,VY,0
D,ALL,VZ,0
ALLSEL,ALL
```

```
!定义边界上的温度
DL,4, ,TEMP,600,0
DL,2, ,TEMP,300,0
!设置流体求解选项
FLDATA1,SOLU,TRAN,0
FLDATA1,SOLU,FLOW,1
FLDATA1,SOLU,TEMP,1
FLDATA1,SOLU,TURB,1
!定义总体迭代次数
FLDATA2,ITER,EXEC,20,
!设置计算结果的输出
FLDATA5,OUTP,PTOT,1
FLDATA5,OUTP,TTOT,1
FLDATA5,OUTP,HFLU,1
FLDATA5,OUTP,HFLM,1
FLDATA5,OUTP,STRM,1
FLDATA5,OUTP,PCOE,1
FLDATA5,OUTP,MACH,1
FLDATA5,OUTP,YPLU,1
FLDATA5,OUTP,TAUW,1
FLDATA5,OUTP,RDFL,1
!设置流体属性参数
FLDATA13,VARY,DENS,1
FLDATA7,PROT,DENS,AIR-SI
FLDATA7,PROT,VISC,AIR-SI
FLDATA7,PROT,COND,AIR-SI
FLDATA8,NOMI,COND,-1
FLDATA7,PROT,SPHT,AIR-SI
!设置流场的重力加速度
ACEL,0,9.8,0,
!设置流体湍流模型
FLDATA24,TURB,MODL,3
FLDATA24,RNGT,CMU,0.085,
FLDATA24,RNGT,C1,1.42,
FLDATA24,RNGT,C2,1.68,
FLDATA24,RNGT,SCTK,0.72,
FLDATA24,RNGT,SCTD,0.72,
FLDATA24,RNGT,BETA,0.012,
FLDATA24,RNGT,ETAI,4.38,
!设置求解流体对流项算法
FLDATA,ADVM,MOME,SUPG
FLDATA,ADVM,TURB,SUPG
FLDATA,ADVM,PRES,SUPG
FLDATA,ADVM,TEMP,SUPG
!开始求解
SOLVE
```

第 13 章 弯管的瞬态流场分析



13.1 问题的描述

13.1.1 几何模型

图 13-1 所示为弯管的二维模型简图，图中给出了二维弯管的几何尺寸，单位为 mm。

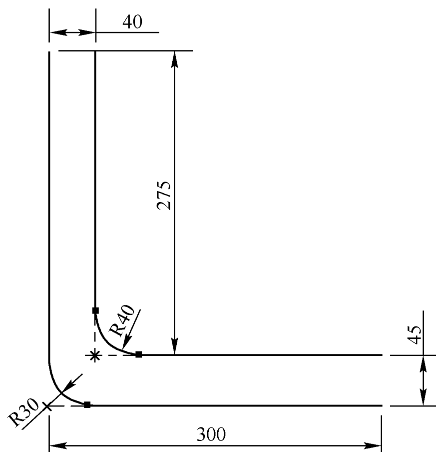


图 13-1 弯管的二维模型简图

13.1.2 流体属性参数

该实例的流体介质为水，因为不考虑温度，因此只需要给出流体的密度和粘度。水的密度为 1000kg/m^3，粘度为 0.002kg/（m/s）。

13.1.3 选择单元

本实例选用二维流体单元 FLUID141 单元。

13.1.4 流体流动模型

该实例假设流体的流动状态为湍流，并且使用 SST 湍流模型。

13.1.5 边界条件及载荷

假设壁面条件为无滑移边界条件，进口初始流速为 5m/s，出口的相对压力为 100Pa，并

且考虑流动重力，重力方向竖直向下。计算初始时间为 0.0001s，总计算时间为 0.05s。

13.2 GUI 操作

13.2.1 前处理

1．定义文件名

GUI：Utility Menu | File | Change Jobname，弹出一个对话框，在文本框中输入“Transient Flow elbow”，单击 OK 按钮。

2．选择单元

GUI：Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击 Add 按钮，弹出图 13-2 所示的选择单元对话框，选择左侧中的 FLOTRAN CFD 项，然后在右边选择 2D FLOTRAN 141 项，单击 OK 按钮。

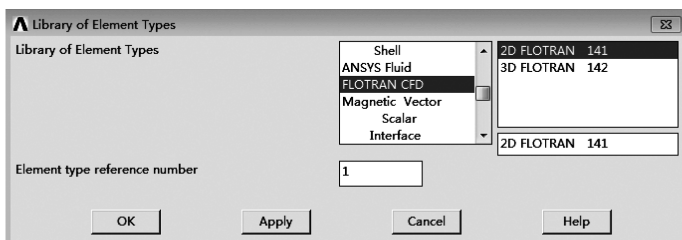


图 13-2　选择单元对话框

3．建立模型

（1）定义关键点

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS，弹出图 13-3 所示的在激活坐标系中定义关键点面板，在面板中关键点号（Keypoint number）文本框中输入“1”，在激活的坐标系中输入 X=0、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮，继续设置关键点号为 2，X=0.3、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 3，X=0.3、Y=0.45、Z=0，单击 Apply 按钮；继续输入关键点号为 4，X=0.04、Y=0.045、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 5，X=0.04、Y=0.32、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 6，X=0、Y=0.32、Z=0，单击 OK 按钮。

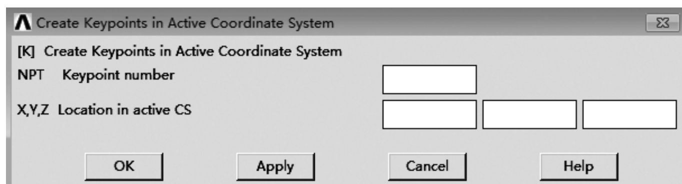


图 13-3　在激活坐标系中定义关键点面板

（2）定义线

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | In Active Coord，弹

出拾取对话框，拾取关键点 1 和 2，单击 Apply 按钮；继续拾取关键点 2 和 3，单击 Apply 按钮；继续拾取关键点 3 和 4，单击 Apply 按钮；继续拾取关键点 4 和 5，单击 Apply 按钮；继续拾取关键点 5 和 6，单击 OK 按钮。

（3）定义线圆角

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Line Fillet，弹出拾取对话框，拾取线 L4 和 L3，单击 Apply 按钮，弹出图 13-4 所示的直线圆角设置面板，设置圆角半径（Fillet radius）为 0.04，单击 Apply 按钮；返回拾取对话框，继续拾取线 L1 和 L6，单击 Apply 按钮，弹出图 13-4 所示的直线圆角设置面板，设置圆角半径（Fillet radius）为 0.03，单击 OK 按钮。

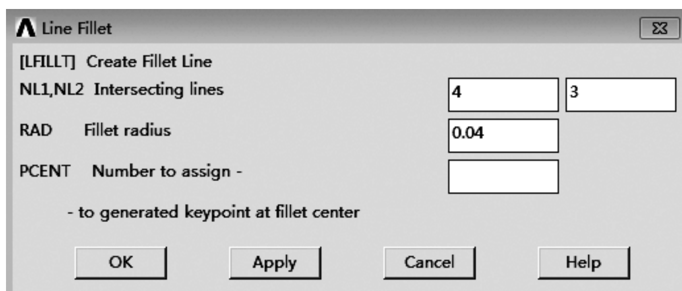


图 13-4 直线圆角设置面板

（4）定义面

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | By Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L1、L2、L3、L7、L4、L5、L6 和 L8，单击 OK 按钮。

4．网格划分

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool

（2）设置总体网格尺寸

选择图 13-5 所示的网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设置（Set）按钮，弹出图 13-6 所示的总体网格尺寸设置面板。

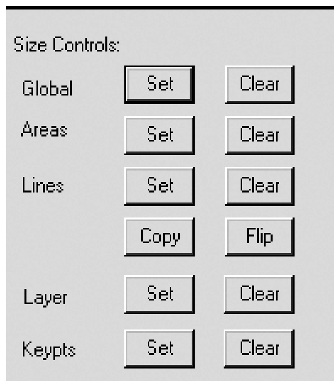


图 13-5 网格划分工具面板中尺寸控制子面板

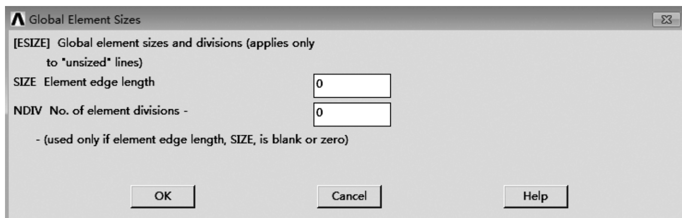


图 13-6 总体网格尺寸设置面板

该设置面板中存在两个控制选项，即单元尺寸控制（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸文本框中输入“0.003”，单击 OK 按钮。

（3）划分网格

选择网格划分工具面板上的网格划分（Mesh）按钮，弹出拾取对话框，拾取矩形，单击 OK 按钮。

13.2.2 求解

1．定义边界条件

（1）定义壁面条件

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L6、L8、L1、L3、L7 和 L4，单击 OK 按钮，弹出图 13-7 所示的在节点处施加速度设置面板，输入 VX=0、VY=0 和 VZ=0，单击 OK 按钮。

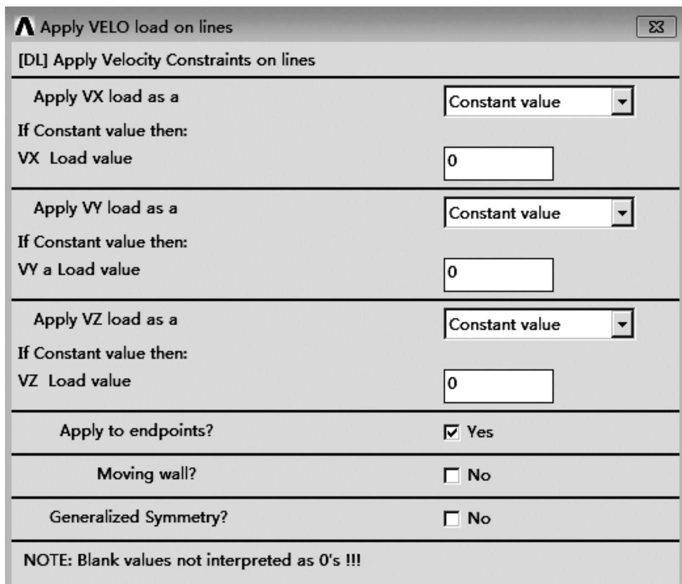


图 13-7 在节点处施加速度设置面板

（2）定义入口初始速度

1）选择入口节点。

GUI：Utility Menu | Select | Entities，弹出图 13-8 所示的选择节点设置面板，设置选择

的实体类型为 Nodes，选择方式为 By Location，设置位置坐标为 Y coordinates，设置坐标的最小值为 0.32，单击 OK 按钮。

2）定义入口初始速度。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Initial Condit'n | Define，弹出拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出图 13-9 所示的定义初始条件设置面板，设置需要指定的自由度为 VY，初始值为–5，表示流体从上面的入口流入弯管，单击 OK 按钮。

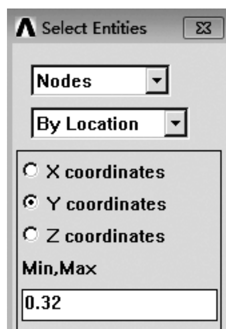


图 13-8 选择节点设置面板

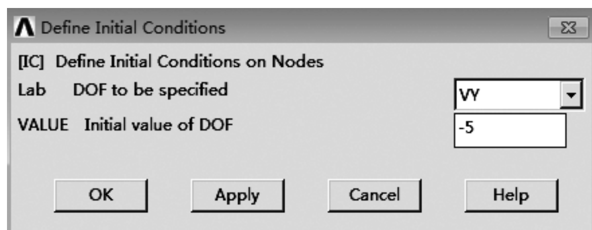


图 13-9 定义初始条件设置面板

3）选择所有实体。

GUI：Utility Menu | Select | Everything

（3）定义出口压力

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Pressure DOF | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L2，单击 OK 按钮，弹出图 13-10 所示的在线上施加压力设置面板，输入压力值为 100，单击 OK 按钮。

2．设置流体求解选项

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Solution Options，弹出图 13-11 所示的流体求解选项设置面板，设置 TRAN 选项为 Transient，即求解瞬态流体流动问题；设置 TURB 选项为 Turbulent，即流体流动状态为湍流，其他选项保持默认值，单击 OK 按钮。

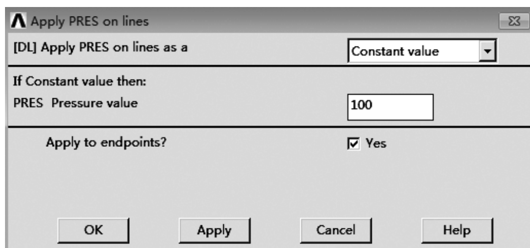


图 13-10 在线上施加压力设置面板

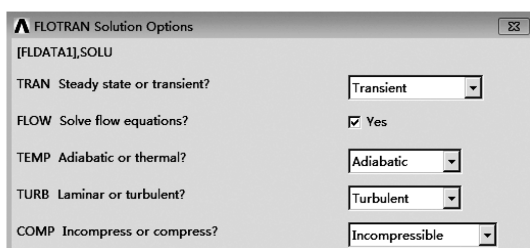


图 13-11 流体求解选项设置面板

3．设置求解控制

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Execution Ctrl，弹出图 13-12 所示的时间步控制设置面板，设置时间步控制方式为自适应（Advection），设置输出控制方式为时间值（Time Values），单击 OK 按钮。

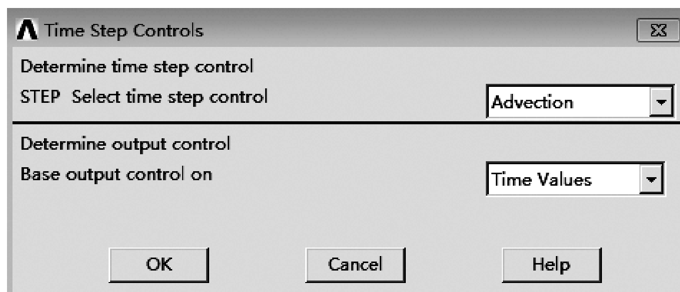


图 13-12　时间步控制设置面板

弹出图 13-13～图 13-15 所示的瞬态求解中的求解时间、迭代和结果输出设置面板，设置初始时间步值（Initial time step value）为 0.001，求解终止时间为 0.05，设置每个时间点的总体迭代次数（Global iter per time step）为 20，设置计算结果每隔 0.0001s 输出一次（Append frequency to results file），单击 OK 按钮。

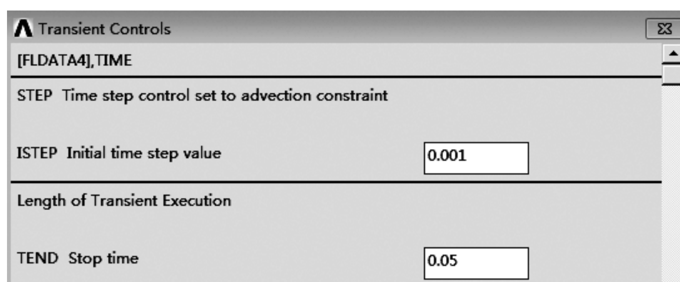


图 13-13　瞬态控制中求解时间设置面板

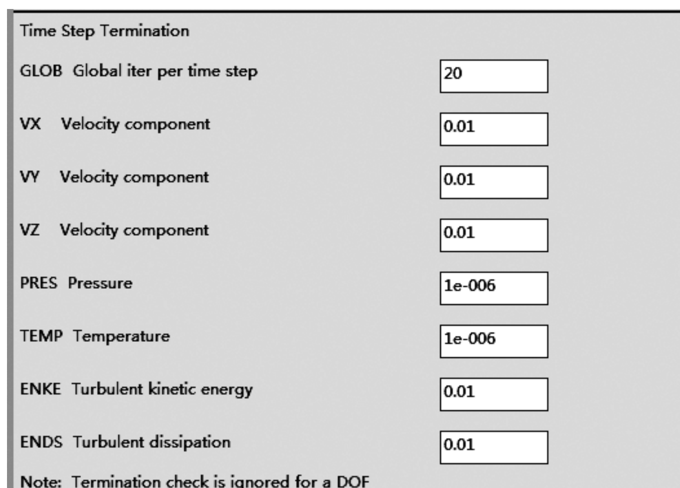


图 13-14　瞬态控制中迭代设置面板

4．设置计算结果输出

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Additional Out | RFL Out Derived，弹出图 13-16 所示的导出量输出控制面板，勾选面板上的所有选项，单击 OK 按钮。

[FLDATA4],TIME - Transient control by time
Overwrite frequency to results file
TIME,OVER Time interval 0
Append frequency to results file
TIME,APPE Time interval 0.0001
Summary frequency to output file
TIME,SUMF Time interval 1000000

图 13-15 瞬态控制中结果输出设置面板

RFL Output Derived
[FLDATA5],OUTP Output options for FLOTRAN results file
for calculated output quantities
PTOT Output total pressure? Yes
TTOT Output total temperature? Yes
HFLU Output heat flux? Yes
HFLM Output film coefficients? Yes
STRM Output stream function? Yes
PCOE Output pressure coeff? Yes
MACH Output Mach number? Yes
YPLU Output y plus? Yes
TAUW Output wall shear stress? Yes
RDFL Output radiation flux? Yes
OK Cancel Help

图 13-16 导出量输出控制面板

5. 设置流体属性参数

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Fluid Properties，弹出图 13-17 所示的流体属性参数设置面板，设置密度选项为常数（Constant），设置粘度选项为常数（Constant），单击 OK 按钮，弹出图 13-18 所示的计算流体属性设置面板，设置流体密度为 1000，粘度为 0.002，单击 OK 按钮。

Fluid Properties
[FLDATA12],PROP,DENS
Density Constant
[FLDATA13],VARY,DENS
Allow density variations? No
[FLDATA12],PROP,VISC
Viscosity Constant
[FLDATA13],VARY,VISC
Allow viscosity variations? No

图 13-17 流体属性参数设置面板

6．设置流体环境

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Flow Environment | Gravity，弹出图 13-19 所示的流体重力设置面板，因为考虑流体竖直向下的重力，因此设置 *Y* 方向加速度为 9.8，单击 OK 按钮。

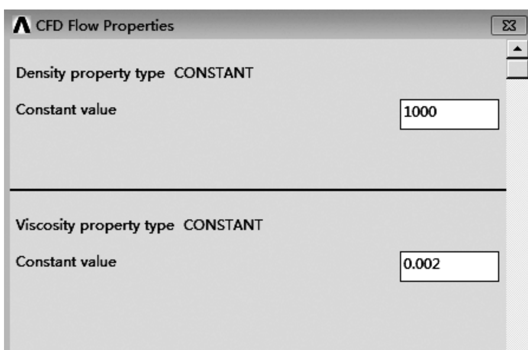


图 13-18　计算流体属性设置面板

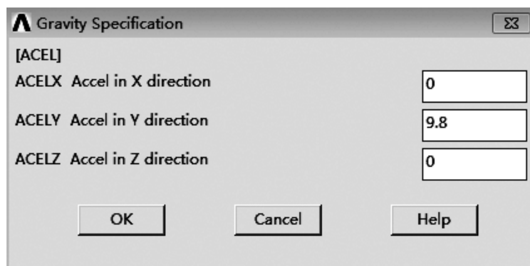


图 13-19　流体重力设置面板

7．设置流体松弛/稳定参数

（1）设置流体求解稳定参数

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Relax/Stab/Cap | Stability Parms，弹出图 13-20 所示的流体求解稳定参数设置面板，设置压力惯性参数（Pressure inertia）为 5×10^{15}，设置人工阻尼（Artificial viscosity）为 0.2，单击 OK 按钮。

（2）设置流体求解自由度松弛参数

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Relax/Stab/Cap | DOF Relaxation，弹出图 13-21 所示的流体求解自由度松弛参数设置面板，设置压力松弛系数为 0.8，单击 OK 按钮。

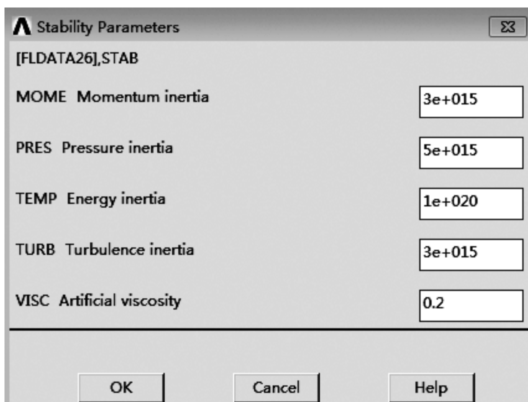


图 13-20　流体求解稳定参数设置面板

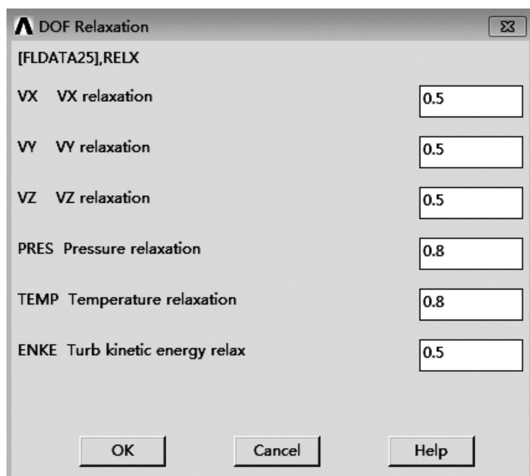


图 13-21　流体求解自由度松弛参数设置面板

8．设置流体湍流模型

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Turbulence | Turbulence Model，弹出图 13-22 所示的流体湍流模型设置面板，选择湍流模型为 Shear Stress Transport，单击 OK 按钮，弹出 SST 湍流模型相应的计算参数设置面板，保持默认设置，单击 OK 按钮。

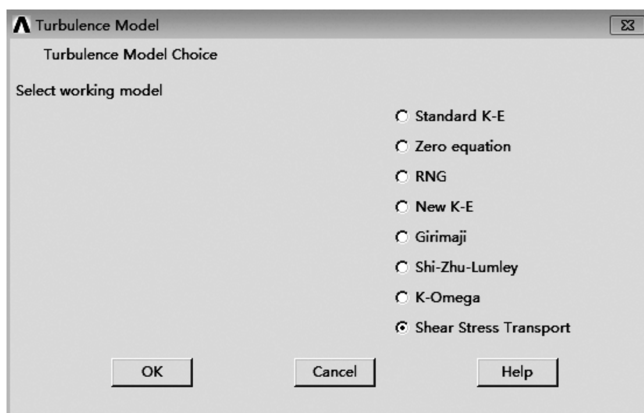


图 13-22 流体湍流模型设置面板

9．设置求解流体对流项算法

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Advection，弹出图 13-23 所示的流体对流项求解算法设置面板，设置动量方程、湍流方程和能力方程的算法都为 COLG，可压缩压力方程的算法为 SUPG，单击 OK 按钮。

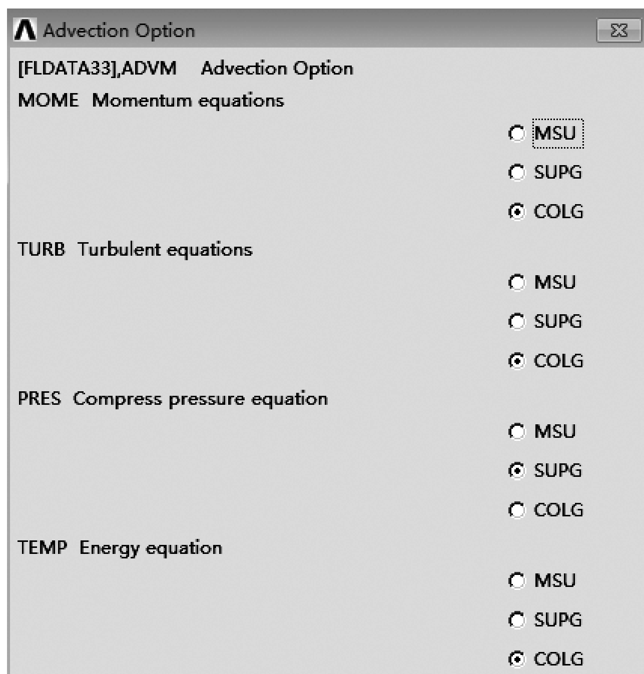


图 13-23 流体对流项求解算法设置面板

10．设置瞬态求解

（1）设置瞬态求解算法

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Transient Ctrl | Time Integration，弹出图 13-24 所示的瞬态求解算法设置面板，设置算法为纽马克法（Newmark），单击 OK 按钮。

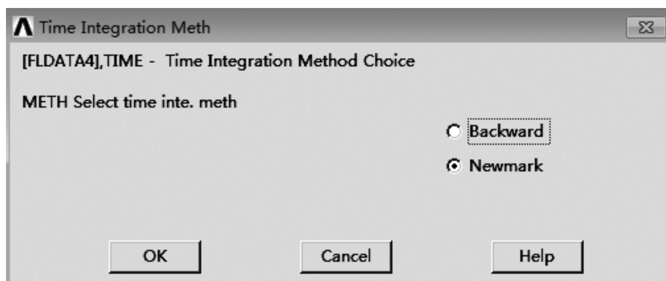


图 13-24 瞬态求解算法设置面板

（2）设置瞬态求解质量单元类型

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Transient Ctrl | Mass Type，弹出图 13-25 所示的流体方程中质量矩阵类型设置面板，设置动量方程和压力方程中质量矩阵为一致质量矩阵（CONS），湍流方程中质量矩阵为集中质量矩阵（LUMP），单击 OK 按钮。

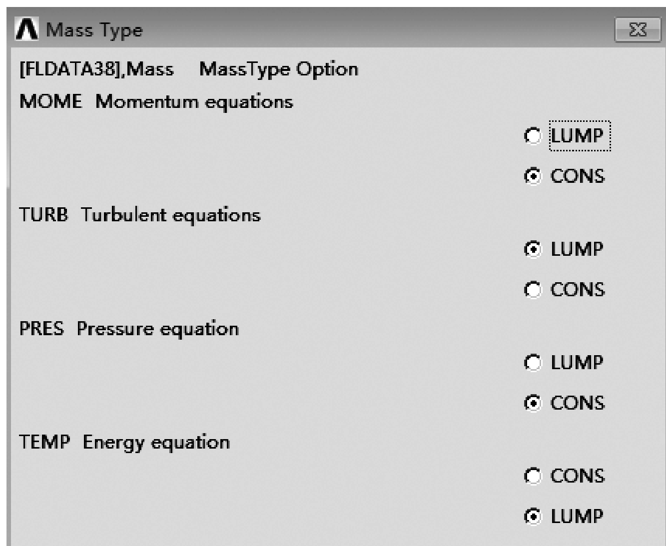


图 13-25 流体方程中质量矩阵类型设置面板

11．求解

GUI：Main Menu | Solution | Run FLOTRAN，开始求解。

13.2.3 后处理

图 13-26～图 13-35 所示为弯管不同的计算结果，查看详细的计算结果，用户可参见本

章的视频教程。

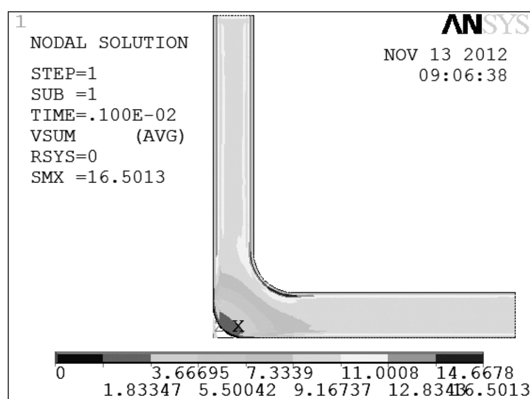


图 13-26　初始时刻的流场速度云图

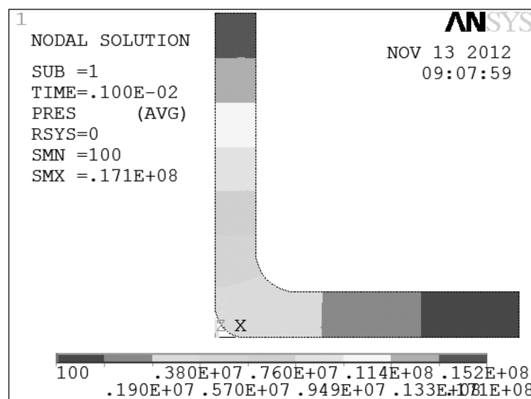


图 13-27　初始时刻的流场压力云图

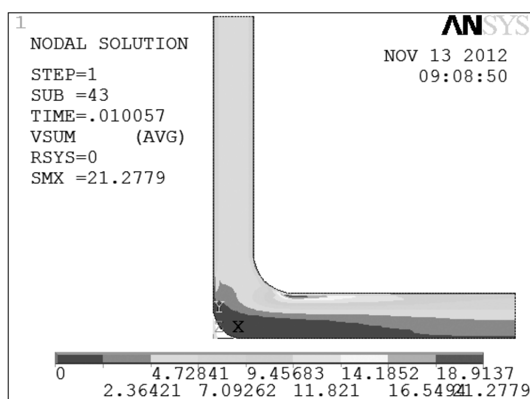


图 13-28　*T*=0.100 57s 的流场速度云图

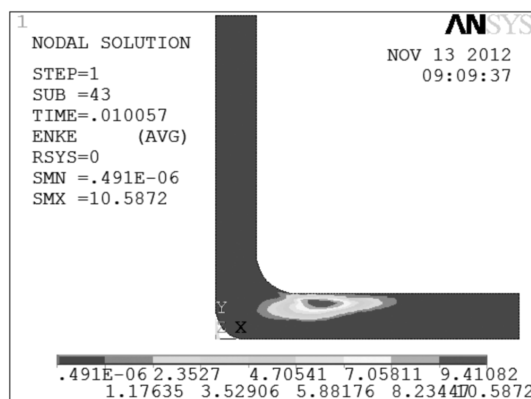


图 13-29　*T*=0.100 57s 的流场湍流动能云图

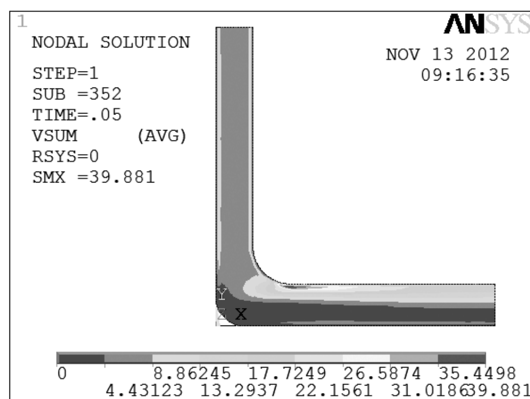


图 13-30　*T*=0.05s 的流场速度云图

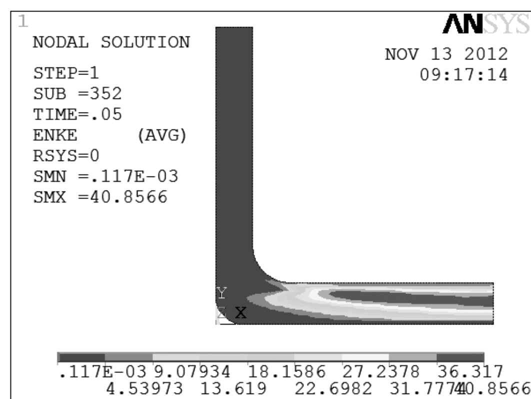


图 13-31　*T*=0.05s 的流场湍流动能云图

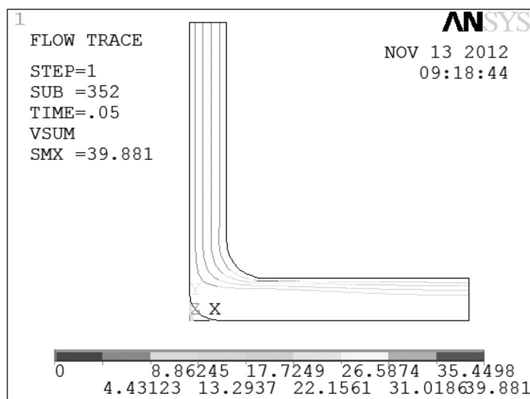


图 13-32　T=0.05s 的流场流速迹线云图

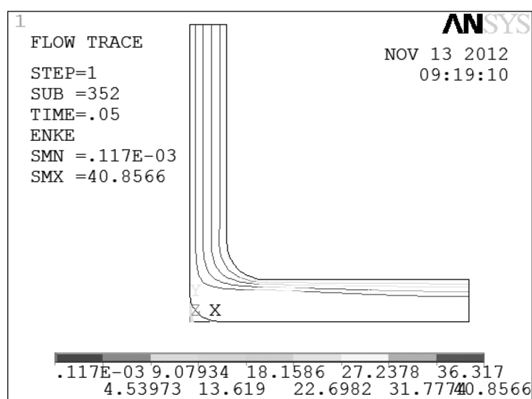


图 13-33　T=0.05s 的流场湍流动能迹线云图

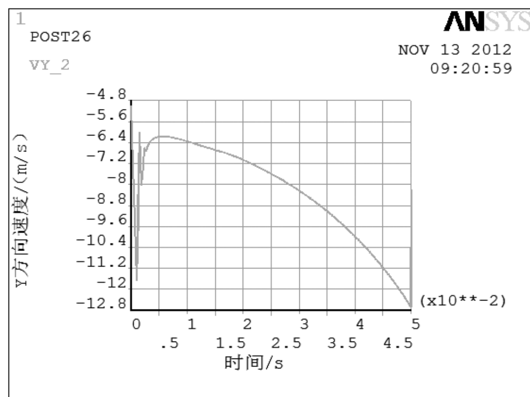


图 13-34　290 节点处 Y 方向速度与时间的关系

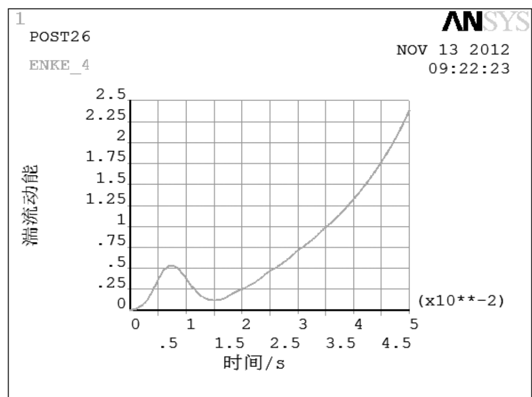


图 13-35　421 节点处湍流动能与时间的关系

13.3　命令流

```
/FILNAME,Transient Flow elbow,0
/PREP7
!定义流体分析
ET,1,141
!建立模型
K,1,0,0        !定义关键点
K,2,0.300,0
K,3,0.300,0.045,
K,4,0.040,0.045
K,5,0.040,0.320
K,6,0,0.320
L,1,2     !通过关键点定义线
L,2,3
L,3,4
```



```
L,4,5
L,5,6
L,6,1
!定义线的倒角
LFILLT,4,3,0.04, ,
LFILLT,6,1,0.03, ,
!使用线建立面
AL,1,2,3,7,4,5,6,8
!划分网格
ESIZE,0.003
AMESH,ALL
!进入求解
/SOL
!定义初始流速
FLST,2,15,1,ORDE,3
FITEM,2,202
FITEM,2,281
FITEM,2,-294
IC,P51X,VY,-5,
!定义无滑移边界条件
DL,4, ,VX,0,1
DL,4, ,VY,0,1
DL,4, ,VZ,0,1
DL,7, ,VX,0,1
DL,7, ,VY,0,1
DL,7, ,VZ,0,1
DL,3, ,VX,0,1
DL,3, ,VY,0,1
DL,3, ,VZ,0,1
DL,6, ,VX,0,1
DL,6, ,VY,0,1
DL,6, ,VZ,0,1
DL,8, ,VX,0,1
DL,8, ,VY,0,1
DL,8, ,VZ,0,1
DL,1, ,VX,0,1
DL,1, ,VY,0,1
DL,1, ,VZ,0,1
!定义出口压力
DL,2, ,PRES,100,1
!设置流体求解选项
FLDATA1,SOLU,TRAN,1
FLDATA1,SOLU,TURB,1
!设置求解控制
*SET,_z4,-1
*SET,_z14,-999
```

```
!*
FLDATA4,TIME,STEP,-1
FLDATA4,TIME,ISTEP,0.001,
FLDATA4,TIME,NUMB,1.0e06
FLDATA4,TIME,TEND,0.05,
FLDATA4,TIME,GLOB,20,
FLDATA4,TIME,VX,0.01,
FLDATA4,TIME,VY,0.01,
FLDATA4,TIME,VZ,0.01,
FLDATA4,TIME,PRES,1e-006,
FLDATA4,TIME,TEMP,1e-006,
FLDATA4,TIME,ENKE,0.01,
FLDATA4,TIME,ENDS,0.01,
FLDATA4A,STEP,OVER,0
FLDATA4,TIME,OVER,0,
FLDATA4A,STEP,APPE,0
FLDATA4,TIME,APPE,0.00001,
FLDATA4A,STEP,SUMF,0
FLDATA4,TIME,SUMF,1000000,
FLDATA4,TIME,BC,0
!设置计算结果输出
FLDATA5,OUTP,PTOT,1
FLDATA5,OUTP,TTOT,1
FLDATA5,OUTP,HFLU,1
FLDATA5,OUTP,HFLM,1
FLDATA5,OUTP,STRM,1
FLDATA5,OUTP,PCOE,1
FLDATA5,OUTP,MACH,1
FLDATA5,OUTP,YPLU,1
FLDATA5,OUTP,TAUW,1
FLDATA5,OUTP,RDFL,1
!设置流体属性参数
FLDATA8,NOMI,DENS,1000,
FLDATA13,VARY,DENS,1
FLDATA8,NOMI,VISC,0.002,
!设置考虑流体的重力
ACEL,0,9.8,0,
!设置流体松弛/稳定参数
FLDATA26,STAB,MOME,3e+015,
FLDATA26,STAB,PRES,5e+015,
FLDATA26,STAB,TEMP,1e+020,
FLDATA26,STAB,TURB,3e+015,
FLDATA26,STAB,VISC,0.2,

FLDATA25,RELX,PRES,0.8,
!选择湍流模型
```



```
FLDATA24,TURB,MODL,1
!设置求解流体对流项算法
FLDATA,ADVM,MOME,COLG
FLDATA,ADVM,TURB,COLG
FLDATA,ADVM,PRES,SUPG
FLDATA,ADVM,TEMP,COLG
!设置瞬态求解
FLDATA4,TIME,METH,NEWM          !选择瞬态求解算法
FLDATA4,TIME,DELTA,0.5,
FLDATA38,MASS,MOME,CONS         !设置瞬态求解质量矩阵类型
FLDATA38,MASS,PRES,CONS
SOLVE
```

第 14 章　钝体绕流瞬态分析

14.1　问题的描述

14.1.1　几何模型

图 14-1 所示为钝体绕流分析的二维模型简图，图中给出了流体区域的宽度为 4m，长度为 12m，钝体为正方形，其边长为 0.4m。该模型是对河流中存在方形固体的问题的简化模型。

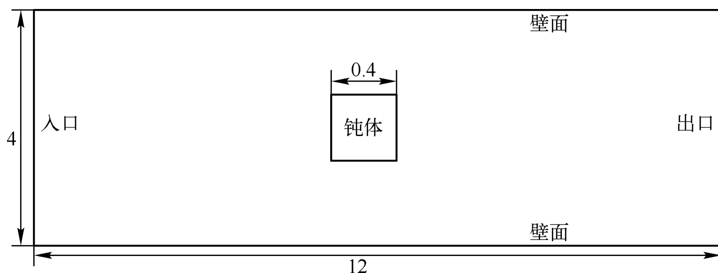


图 14-1　钝体绕流分析的二维模型简图

14.1.2　流体属性参数

该实例的流体为水，因为不考虑温度，因此只需要给出流体的密度和粘度。水的密度为 1000kg/m^3，粘度为 0.000015kg/（m/s）。

14.1.3　选择单元

本实例选用二维流体单元 FLUID141 单元。

14.1.4　流体流动模型

该实例假设流体的流动状态为湍流，并且使用 RNG 湍流模型。

14.1.5　边界条件及载荷

假设壁面条件为无滑移边界条件，进口流速为抛物线分布，最大值为 12m/s，出口的相对压力为 0，钝体四边为无滑移边界条件。计算初始时间为 0.015s，总计算时间为 6s。

14.2 GUI 操作

14.2.1 前处理

1．定义文件名

GUI：Utility Menu | File | Change Jobname，弹出一个对话框，在文本框中输入“Flow around blunt bodies”，单击 OK 按钮。

2．选择单元

GUI：Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击 Add 按钮，弹出图 14-2 所示的选择单元对话框，选择左侧中的 FLOTRAN CFD 项，然后在右边选择 2D FLOTRAN 141 项，单击 OK 按钮。

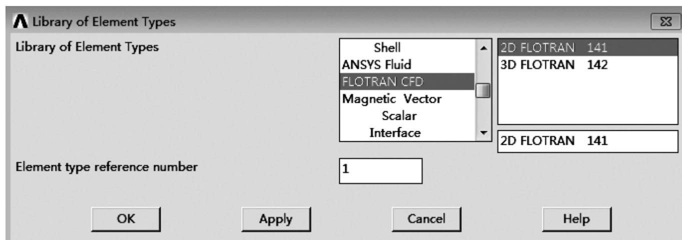


图 14-2 选择单元对话框

3．建立模型

（1）建立流体区域

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By Dimensions，弹出图 14-3 所示的通过尺寸创建长方形设置面板，设置 X1=0、X2=12、Y1=−2 和 Y2=2，单击 OK 按钮。

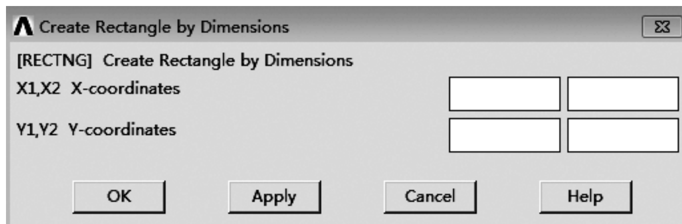


图 14-3 通过尺寸创建长方形设置面板

（2）建立固体区域

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By Dimensions，弹出图 14-3 所示的通过尺寸创建长方形设置面板，设置 X1=4、X2=4.4、Y1=−0.2 和 Y2=0.2，单击 OK 按钮。

（3）进行布尔操作

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Subtract | Areas，弹出

拾取对话框，拾取面 A1，单击 Apply 按钮，拾取面 A2，单击 OK 按钮。

4．网格划分

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool

（2）设置钝体四边的单元数量

选择网格划分工具面板上的尺寸控制（Size Controls）栏中的 Lines 项，单击 Set 按钮，弹出拾取对话框，选择线 L5、L6、L7 和 L8，单击 OK 按钮，弹出图 14-4 所示的线网格设置面板，输入网格数量（No. of element divisions）为 12，单击 OK 按钮。

（3）设置总体网格尺寸

选择图 14-5 所示的网格划分工具面板中尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设置（Set）按钮，弹出图 14-6 所示的总体网格尺寸设置面板。

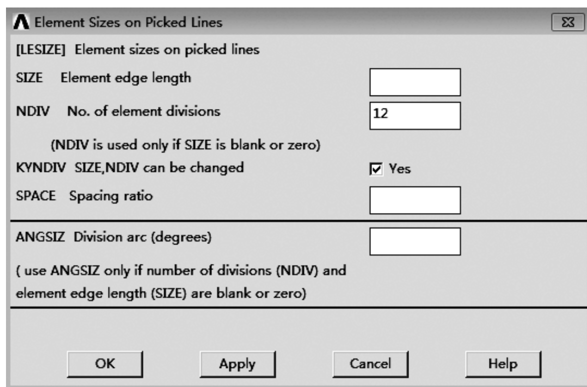


图 14-4　线网格设置面板

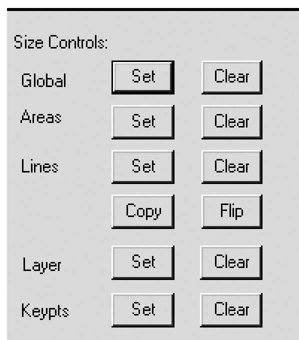


图 14-5　网格划分工具面板中尺寸控制子面板

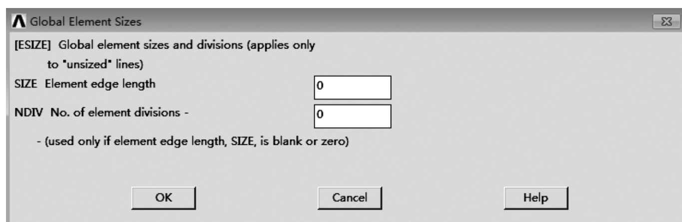


图 14-6　总体网格尺寸设置面板

该设置面板中存在两个控制选项，即单元尺寸控制（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸文本框中输入“0.1”，单击 OK 按钮。

（4）划分网格

单击网格划分工具面板上的网格划分（Mesh）按钮，弹出拾取对话框，单击 Pick All 按钮。

14.2.2 求解

1．定义边界条件

（1）定义壁面条件

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Lines，弹

出拾取对话框，拾取线 L1、L3、L5、L6、L7 和 L8，单击 OK 按钮，弹出图 14-7 所示的在节点处施加速度设置面板，设置 VX=0、VY=0 和 VZ=0，单击 OK 按钮。

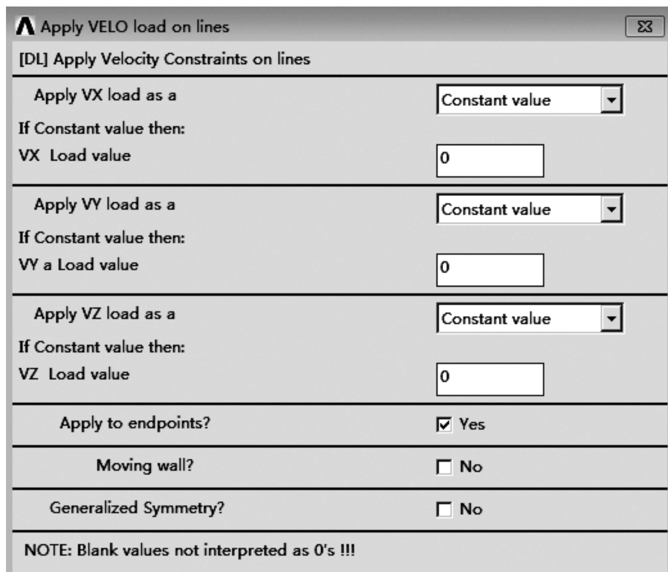


图 14-7　在节点处施加速度设置面板

（2）定义入口速度

1）定义函数。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Functions | Define/Edit，弹出图 14-8 所示的函数编辑器面板，按照图 14-8 进行输入函数表达式。

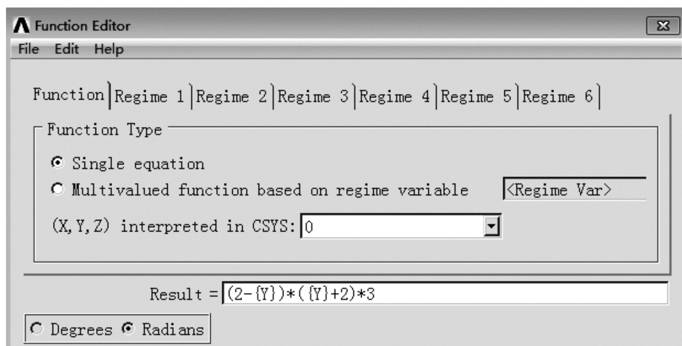


图 14-8　函数编辑器面板

2）保存函数。

选择函数编辑器面板上的菜单命令 File | Save，弹出保存文件的设置面板，设置保存的文件名为 V，单击保存按钮。

3）读入函数。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Functions | Read File，弹出打开文件界面，选择刚保存的文件 V.func，进行打开操作，弹出图 14-9 所示的函数加载器设置面

板，设置表格参数名（Table parameter name）为 V，单击 OK 按钮。

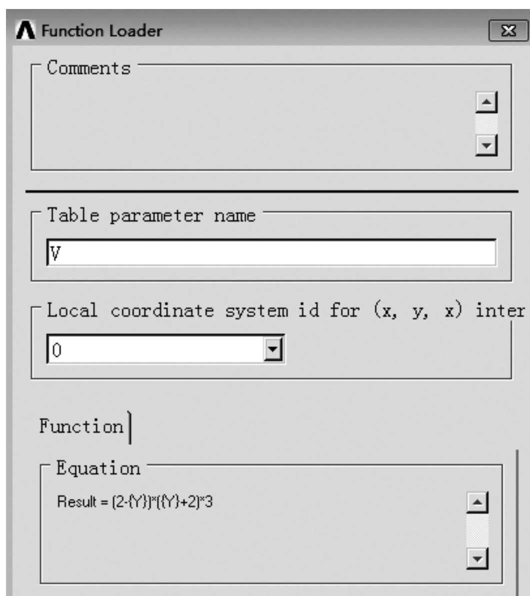


图 14-9　函数加载器设置面板

4）定义入口速度。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L4，单击 OK 按钮，弹出图 14-10 所示的在线处施加加速度设置面板，选择 VX 的载荷形式为存在的表格（Existing table），单击 OK 按钮，弹出图 14-11 所示的在线上施加速度设置面板，选择存在的表格为 V，单击 OK 按钮。

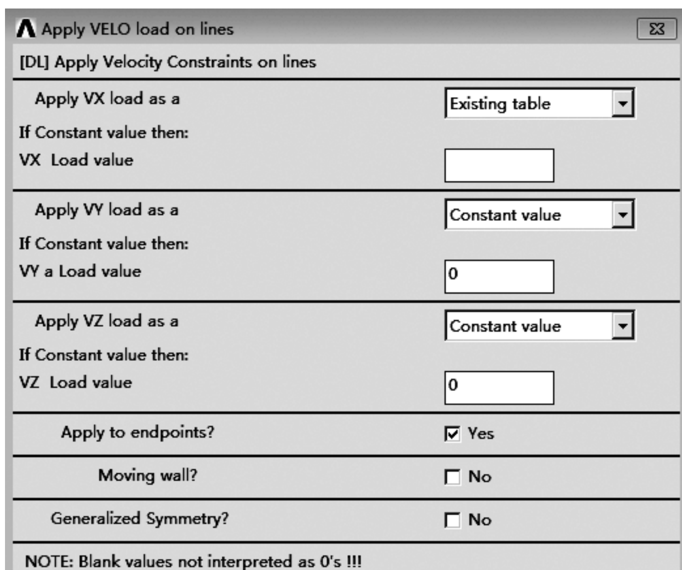


图 14-10　在线处施加加速度设置面板

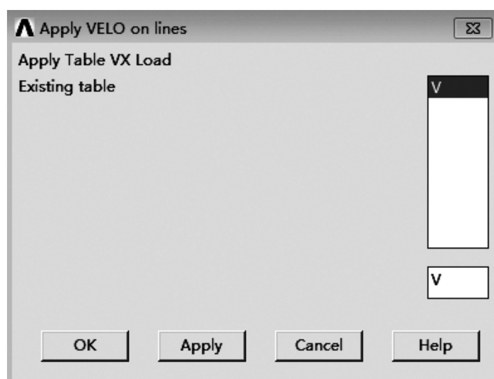


图 14-11 在线上施加速度设置面板

（3）定义出口压力

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Pressure DOF | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L2，单击 OK 按钮，弹出图 14-12 所示的在线上施加压力设置面板，设置压力值为 0，单击 OK 按钮。

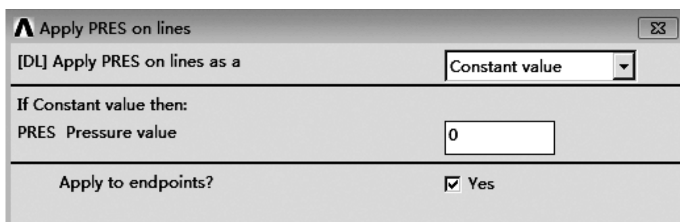


图 14-12 在线上施加压力设置面板

2．设置流体求解选项

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Solution Options，弹出图 14-13 所示的流体求解选项设置面板，设置 TRAN 选项为 Transient，即求解瞬态流体流动问题；设置 TURB 选项为 Turbulent，即流体流动状态为湍流，其他选项保持默认值，单击 OK 按钮。

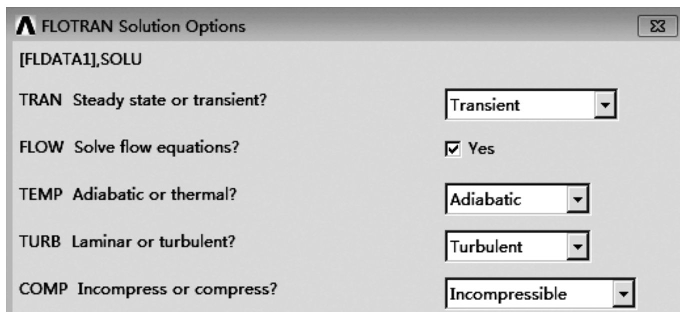


图 14-13 流体求解选项设置面板

3．设置求解控制

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Execution Ctrl，弹出图 14-14 所示的



时间步控制设置面板，设置时间步控制方式为用户定义（User defined），设置输出控制方式为时间值和时间步（Both），单击 OK 按钮。

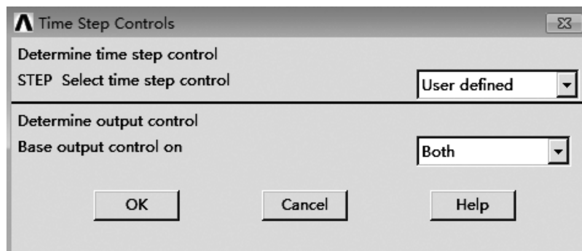


图 14-14 时间步控制设置面板

弹出图 14-15～图 14-17 所示的瞬态求解中的求解时间、迭代和结果输出设置面板，设置用户定义时间步（User-defined time step）为 0.015，时间步数（Number of time steps）为 400，求解终止时间（Stop time）为 6，设置每个时间点的总体迭代次数（Global iter per time step）为 20，设置计算结果每隔 0.015s 输出一次（Append frequency to results file），单击 OK 按钮。

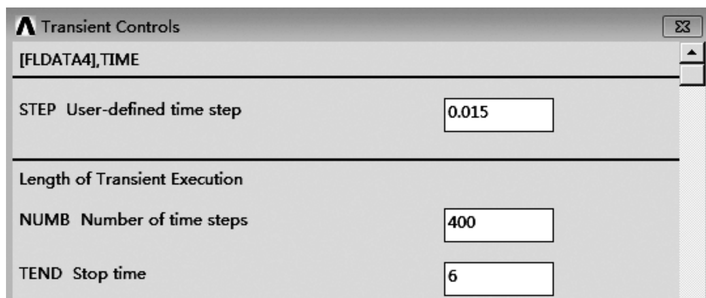


图 14-15 瞬态控制中求解时间设置面板

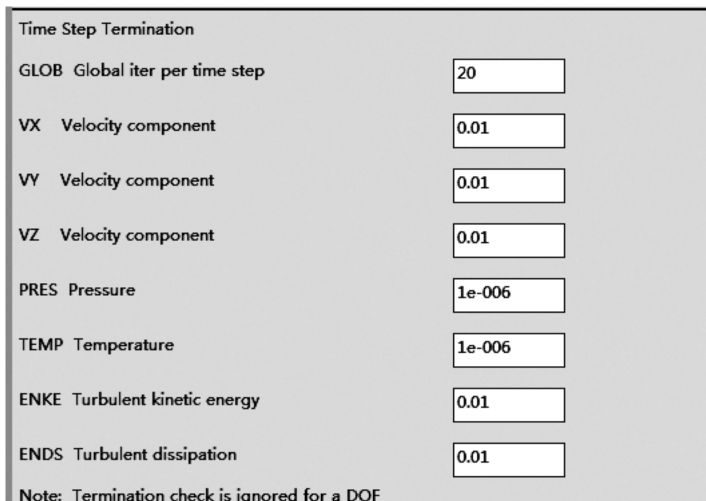


图 14-16 瞬态控制中迭代设置面板

Overwrite frequency to results file	
STEP,OVER Number of time steps	0
TIME,OVER Time interval	0
Append frequency to results file	
STEP,APPE Number of time steps	0
TIME,APPE Time interval	0.015
Summary frequency to output file	
STEP,SUMF Number of time steps	10
TIME,SUMF Time interval	1000000

图 14-17 瞬态控制中结果输出设置面板

4．设置计算结果输出

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Additional Out | RFL Out Derived，弹出图 14-18 所示的导出量输出控制面板，勾选面板上的所有选项，单击 OK 按钮。

RFL Output Derived

[FLDATA5],OUTP Output options for FLOTRAN results file
for calculated output quantities

PTOT Output total pressure?	☑ Yes
TTOT Output total temperature?	☑ Yes
HFLU Output heat flux?	☑ Yes
HFLM Output film coefficients?	☑ Yes
STRM Output stream function?	☑ Yes
PCOE Output pressure coeff?	☑ Yes
MACH Output Mach number?	☑ Yes
YPLU Output y plus?	☑ Yes
TAUW Output wall shear stress?	☑ Yes
RDFL Output radiation flux?	☑ Yes

OK Cancel Help

图 14-18 导出量输出控制面板

5．设置流体属性参数

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Fluid Properties，弹出图 14-19 所示的流体属性参数设置面板，设置密度选项为常数（Constant），设置粘度选项为常数（Constant），单击 OK 按钮，弹出图 14-20 所示的计算流体属性设置面板，设置流体密度为 1000，粘度为 0.000 015，单击 OK 按钮。

6．设置流体求解稳定参数

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Relax/Stab/Cap | Stability Parms，弹出

图 14-21 所示的流体求解稳定参数设置面板，设置人工阻尼（Artificial viscosity）为 0.25，单击 OK 按钮。

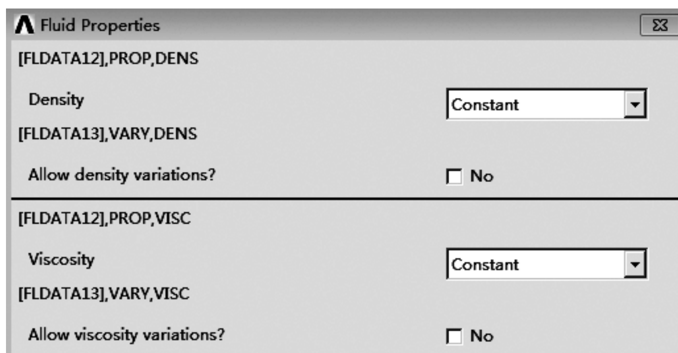


图 14-19 流体属性参数设置面板

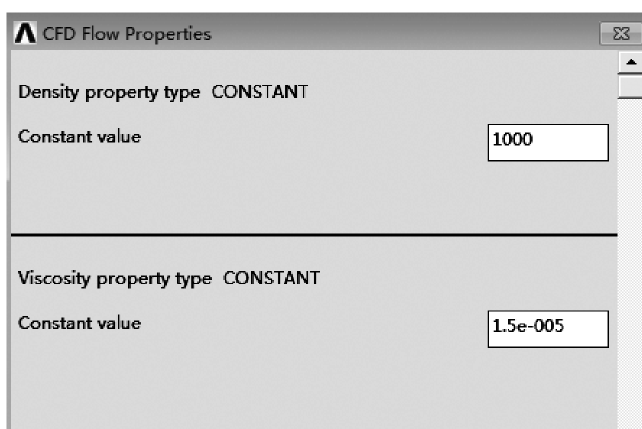


图 14-20 计算流体属性设置面板

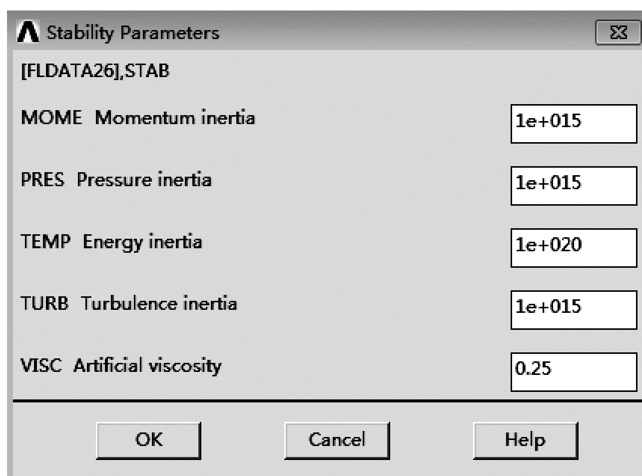


图 14-21 流体求解稳定参数设置面板

7．设置流体湍流模型

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Turbulence | Turbulence Model，弹出图 14-22 所示的流体湍流模型设置面板，选择湍流模型为 RNG，单击 OK 按钮，弹出 RNG 湍流模型相应的计算参数设置面板，保持默认设置，单击 OK 按钮。

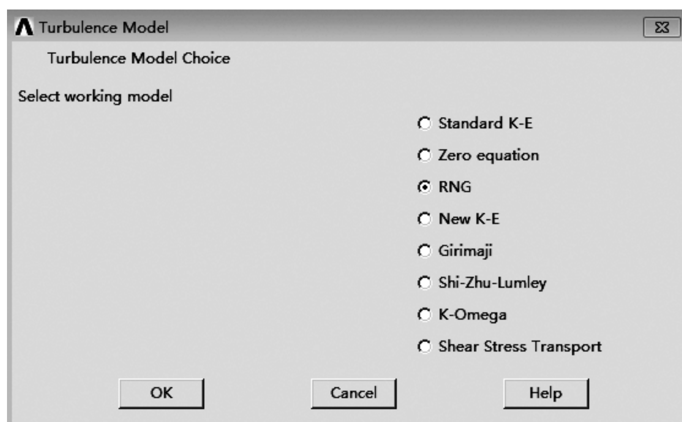


图 14-22 流体湍流模型设置面板

8．设置瞬态求解算法

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Transient Ctrl | Time Integration，弹出图 14-23 所示的瞬态求解算法设置面板，设置算法为纽马克法（Newmark），单击 OK 按钮。

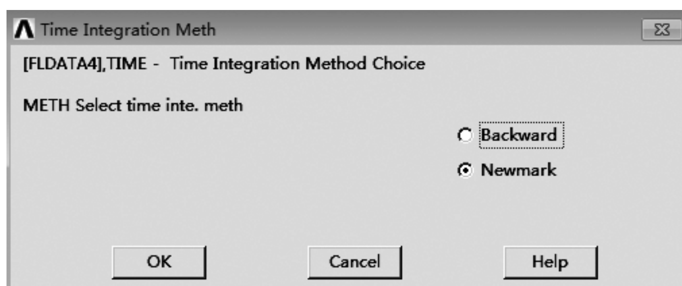


图 14-23 瞬态求解算法设置面板

9．求解

GUI：Main Menu | Solution | Run FLOTRAN，开始求解。

14.2.3 后处理

图 14-24 所示为入口速度与位置的关系图，由图可知，该实例中成功地施加了具有抛物线变化规律的速度。图 14-25～图 14-31 所示为钝体绕流问题不同的计算结果和查看计算结果的方法，用户详见本章的视频教程。



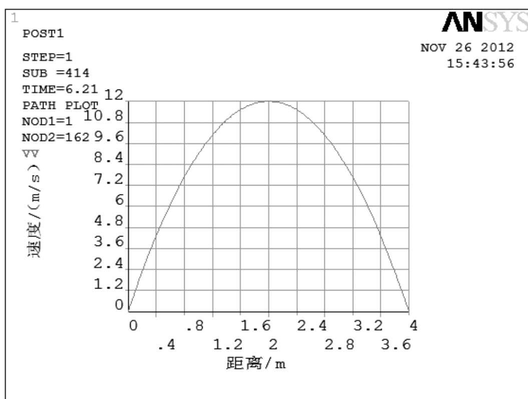


图 14-24 入口流速与位置的关系图

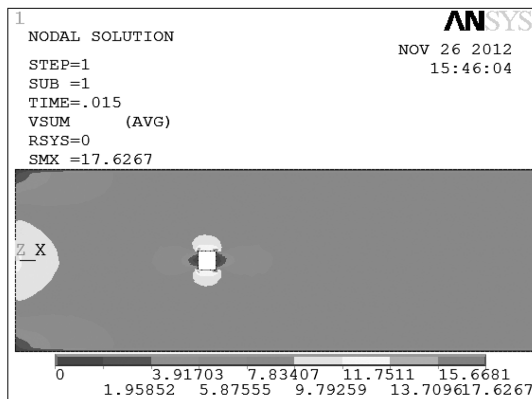


图 14-25 0.015s 时刻的流场速度云图

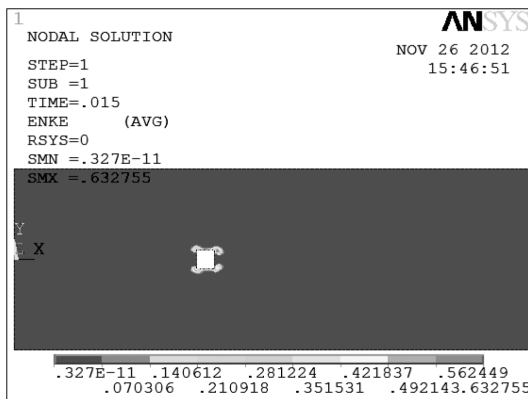


图 14-26 0.015s 时刻的流场湍流动能云图

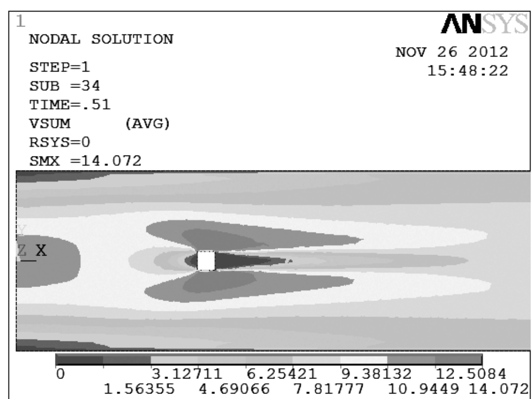


图 14-27 0.51s 时刻流场速度云图

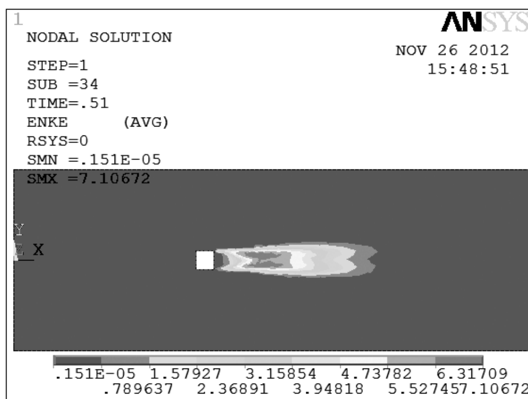


图 14-28 0.51s 时刻的流场湍流动能云图

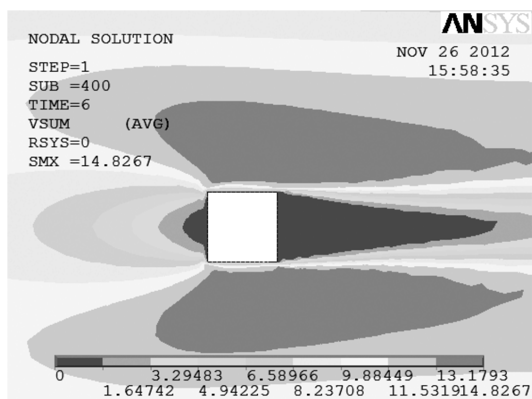


图 14-29 6s 时刻流场速度云图

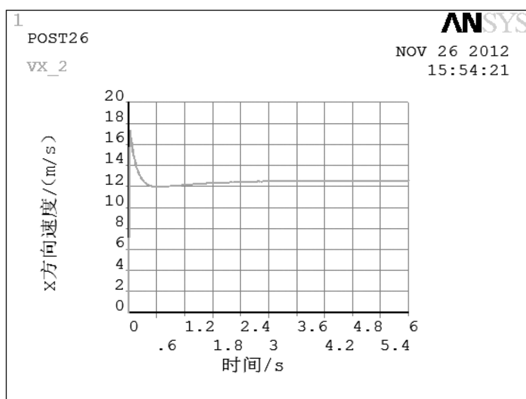


图 14-30　4301 节点处 *X* 方向速度与时间的关系

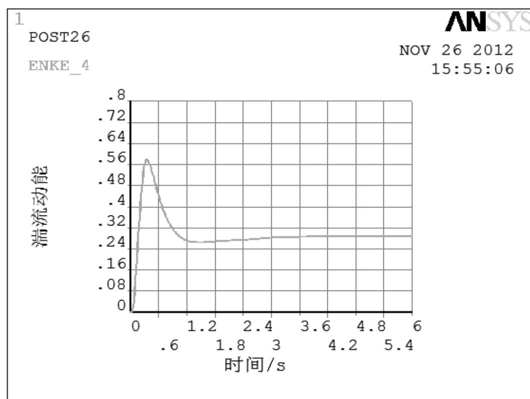


图 14-31　4038 节点处湍流动能与时间的关系

14.3　命令流

```
/FILNAME,Flow around blunt bodies,0
/PREP7
!定义单元
ET,1,141
!将来模型
RECTNG,0,12,−2,2,
RECTNG,4,4.4,−0.2,0.2,
ASBA,1,2 !进行布尔减运算
!划分网格
LESIZE,5,,,15   !设置网格划分尺寸
LESIZE,6,,,15
LESIZE,7,,,15
LESIZE,8,,,15
ESIZE,0.1
AMESH,ALL
!进入求解
/SOL
!定义函数
*DEL,vv
*DEL,_FNCNAME
*DEL,_FNCMTID
*DEL,_FNCCSYS
*SET,_FNCNAME,'vv'
*SET,_FNCCSYS,0
*DIM,%_FNCNAME%,TABLE,6,8,1,,,,%_FNCCSYS%
*SET,%_FNCNAME%(0,0,1), 0.0, −999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,1), 0.0
```

```
*SET,%_FNCNAME%(4,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,1), 1.0, −1, 0, 2, 0, 0, 3
*SET,%_FNCNAME%(0,2,1), 0.0, −2, 0, 1, −1, 2, 3
*SET,%_FNCNAME%(0,3,1),     0, −1, 0, 2, 0, 0, 3
*SET,%_FNCNAME%(0,4,1), 0.0, −3, 0, 1, 3, 1, −1
*SET,%_FNCNAME%(0,5,1), 0.0, −1, 0, 1, −2, 3, −3
*SET,%_FNCNAME%(0,6,1), 0.0, −2, 0, 3, 0, 0, −1
*SET,%_FNCNAME%(0,7,1), 0.0, −3, 0, 1, −1, 3, −2
*SET,%_FNCNAME%(0,8,1), 0.0, 99, 0, 1, −3, 0, 0
!定义边界条件
DL,4, ,VY,0,1
DL,4, ,VX,%VV% ,1
DL,3, ,VY,0,1
DL,1, ,VY,0,1
DL,3, ,VX,0,1
DL,1, ,VX,0,1
DL,5, ,VY,0,1
DL,5, ,VX,0,1
DL,6, ,VY,0,1
DL,6, ,VX,0,1
DL,7, ,VY,0,1
DL,7, ,VX,0,1
DL,8, ,VY,0,1
DL,8, ,VX,0,1
DL,2, ,PRES,0,1
!设置流体求解选项
FLDATA1,SOLU,TRAN,1    !激活瞬态流体分析
FLDATA1,SOLU,FLOW,1    !求解流体流动方程
FLDATA1,SOLU,TURB,1    !激活流体湍流选项
!设置求解控制
FLDATA4,TIME,STEP,0.015,
FLDATA4,TIME,NUMB,400,
FLDATA4,TIME,TEND,6,
FLDATA4,TIME,GLOB,20,
FLDATA4,TIME,APPE,0.01,
!设置计算结果输出
FLDATA5,OUTP,PTOT,1
FLDATA5,OUTP,TTOT,1
FLDATA5,OUTP,HFLU,1
FLDATA5,OUTP,HFLM,1
FLDATA5,OUTP,STRM,1
FLDATA5,OUTP,PCOE,1
FLDATA5,OUTP,MACH,1
FLDATA5,OUTP,YPLU,1
```



```
FLDATA5,OUTP,TAUW,1
FLDATA5,OUTP,RDFL,1
!设置流体属性参数
FLDATA8,NOMI,DENS,1000,
FLDATA8,NOMI,VISC,1.5e-5
!设置流体求解稳定参数
FLDATA26,STAB,MOME,1e+015,
FLDATA26,STAB,PRES,1e+015,
FLDATA26,STAB,TEMP,1e+020,
FLDATA26,STAB,TURB,1e+015,
FLDATA26,STAB,VISC,0.25,
!选择流体湍流模型
FLDATA24,TURB,MODL,3
FLDATA24,RNGT,CMU,0.085,
FLDATA24,RNGT,C1,1.42,
FLDATA24,RNGT,C2,1.68,
FLDATA24,RNGT,SCTK,0.72,
FLDATA24,RNGT,SCTD,0.72,
FLDATA24,RNGT,BETA,0.012,
FLDATA24,RNGT,ETAI,4.38,
!设置流体瞬态求解算法
FLDATA4,TIME,METH,NEWM
FLDATA4,TIME,DELTA,0.5,
!开始求解
SOLVE
```

第 15 章　开闸后水流流动的 VOF 分析

15.1　问题的描述

15.1.1 几何模型

图 15-1 所示为开闸后水流流动分析模型，图中给出了模型的几何尺寸。障碍物 1 的高度为 2m，障碍物 2 的高度为 1.5m，两个障碍物的宽度都是 0.5m，其他尺寸在图中都已经给出。

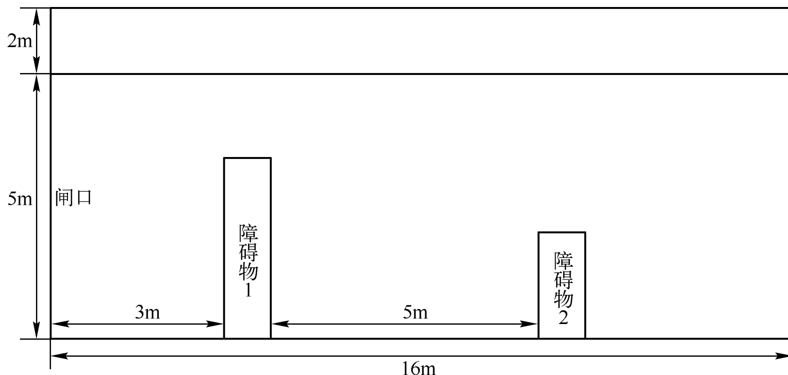


图 15-1　开闸后水流流动分析模型

15.1.2 流体属性参数

该实例的流体为水，因为不考虑温度，因此只需要给出流体的密度和粘度。水的密度为 $1000kg/m^3$，粘度为 1×10^{-6}kg/（m/s）。

15.1.3 选择单元

本实例选用二维流体单元 FLUID141 单元。

15.1.4 流体流动模型

该实例假设流体的流动状态为湍流，并且使用 RNG 湍流模型。

15.1.5 边界条件及载荷

闸口的初始速度为 1.5m/s，障碍物四边和模型底面为无滑移壁面条件，闸口的 VOF 值为 1，考虑重力对流体的影响，计算初始时间为 0.01s，总的计算时间为 9s。

15.2 GUI 操作

15.2.1 前处理

1．定义文件名

GUI：Utility Menu | File | Change Jobname，弹出一个对话框，在文本框中输入“GATE VOF ANALYSIS”，单击 OK 按钮。

2．选择单元

GUI：Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击 Add，弹出图 15-2 所示的选择单元对话框，选择左侧中的 FLOTRAN CFD 项，然后在右边选择 2D FLOTRAN 141 项，单击 OK 按钮。

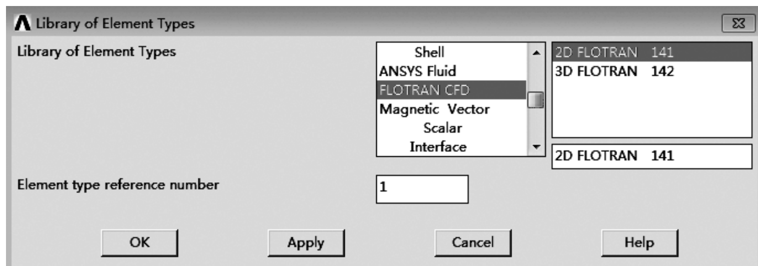


图 15-2　选择单元对话框

3．建立模型

（1）定义关键点

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS，弹出图 15-3 所示的在激活坐标系中定义关键点面板，在面板中关键点号（Keypoint number）文本框中输入“1”，在激活的坐标系中设置 X=0、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 2，X=3、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 3，X=3、Y=2、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 4，X=3.5、Y=2、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 5，X=3.5、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 6，X=8.5、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 7，X=8.5、Y=1.5、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 8，X=9、Y=1.5、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 9，X=9、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 10，X=16、Y=0、

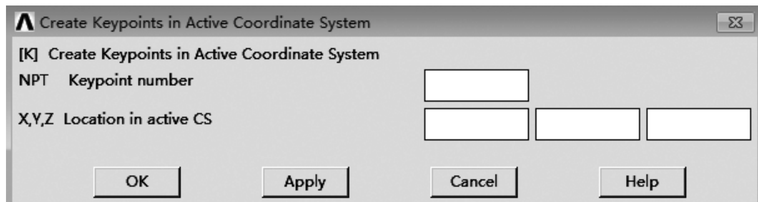


图 15-3　在激活坐标系中定义关键点面板

Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 11，X=16、Y=5、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 12，X=16、Y=7、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 13，X=0、Y=7、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 14，X=0、Y=5、Z=0，单击 OK 按钮。

（2）定义面

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | Through KPs，弹出图 15-4 所示的拾取对话框，在对话框中设置关键点编号为 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13、14，单击 Apply 按钮；继续在拾取对话框中设置关键点编号为 2、13、14、5，单击 Apply 按钮；继续在拾取对话框中设置关键点编号为 8、15、16、11，单击 OK 按钮。

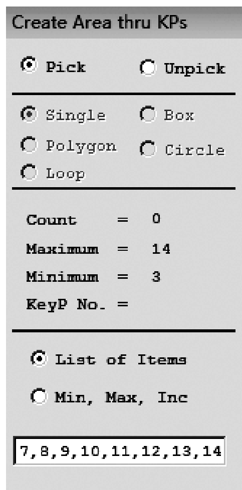


图 15-4 拾取对话框

4．网格划分

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool

（2）设置钝体四边的单元数量

选择网格划分工具面板上的尺寸控制（Size Controls）栏中的 Lines 项，单击 Set 按钮，弹出拾取对话框，选择线 L2 和 L4，单击 OK 按钮，弹出图 15-5 所示的线网格设置面板，输入网格数量（No. of element divisions）为 60，单击 Apply 按钮，弹出拾取对话框，继续拾取线 L3 和 L7，单击 OK 按钮，弹出图 15-5 所示的线网格设置面板，设置网格数量为 20，单击 Apply 按钮，弹出拾取对话框，继续拾取线 L6 和 L8，单击 OK 按钮，弹出图 15-5 所示的线网格设置面板，设置网格数量为 60，单击 OK 按钮。

（3）设置总体网格尺寸

选择图 15-6 所示的网格划分工具面板中尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设置（Set）按钮，弹出图 15-7 所示的总体网格尺寸设置面板。

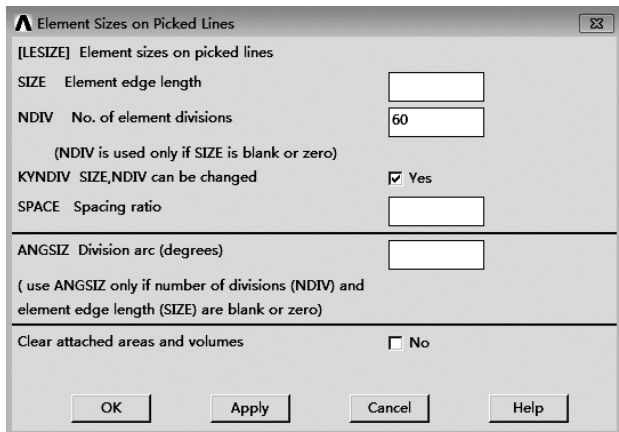


图 15-5 线网格设置面板

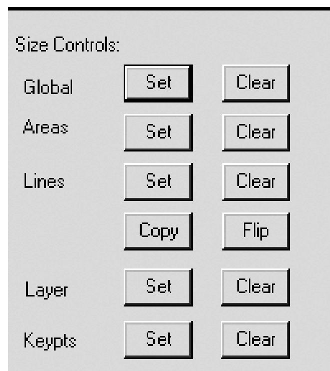


图 15-6 网格划分工具面板中尺寸控制子面板

该设置面板中存在两个控制选项，即单元尺寸控制（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸文本框中输入“0.2”，单击 OK 按钮。

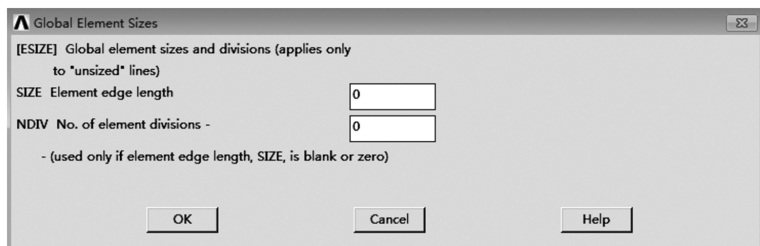


图 15-7 总体网格尺寸设置面板

（4）划分网格

单击网格划分工具面板上的网格划分（Mesh）按钮，弹出拾取对话框，单击 Pick All 按钮。

15.2.2 求解

1．定义流体边界条件

（1）定义壁面条件

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L1、L2、L3、L4、L5、L6、L7、L8 和 L9，单击 OK 按钮，弹出如图 15-8 所示的在节点处施加加速度设置面板，设置 VX=0、VY=0 和 VZ=0，单击 OK 按钮。

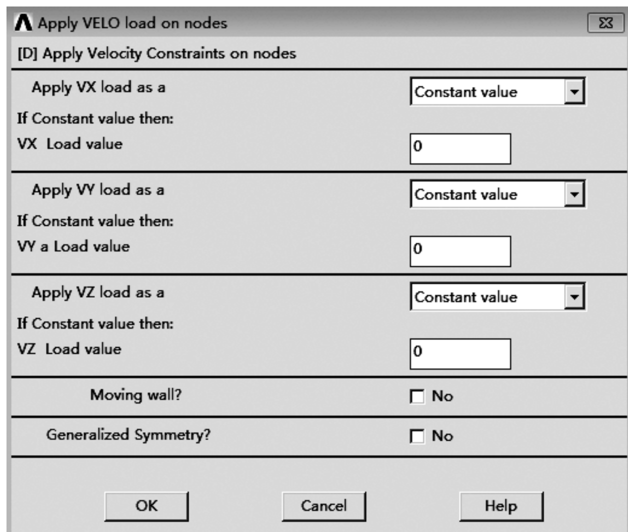


图 15-8 在节点处施加速度设置面板

（2）定义入口速度

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L14，单击 OK 按钮，弹出图 15-8 所示的在节点处施加加速度设置面板，设置 VX=1.5、VY=0 和 VZ=0，单击 OK 按钮。

2．定义闸口处的 VOF 值

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Volume Fract | Bound

Loads | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L14，单击 OK 按钮，弹出图 15-9 所示的在线处施加 VFRC 载荷面板，设置边界值为 1，润湿状态值为 1，单击 OK 按钮。

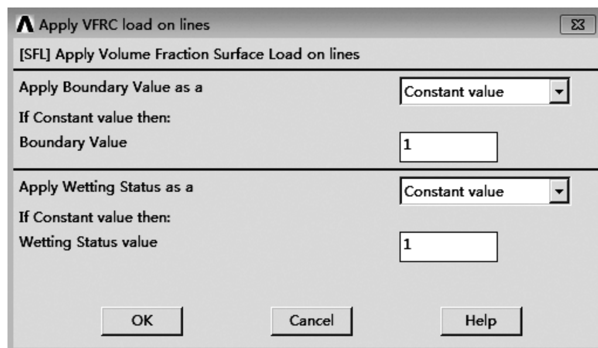


图 15-9　在线处施加 VFRC 载荷面板

3．设置流体求解选项

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Solution Options，弹出图 15-10 所示的流体求解选项设置面板，设置 TRAN 选项为 Transient，即求解瞬态流体流动问题；设置 TURB 选项为 Turbulent，即流体流动状态为湍流，激活 VOF 对流（Activate VOF advection?），其他选项保持默认值，单击 OK 按钮。

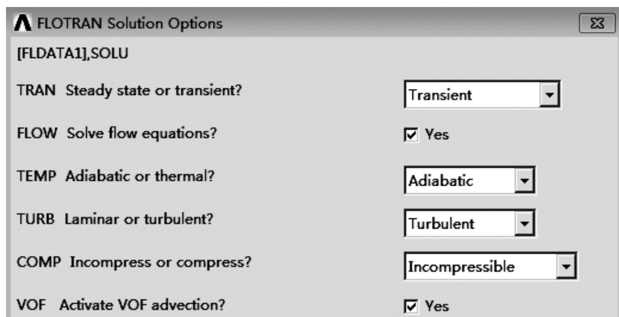


图 15-10　流体求解选项设置面板

4．设置求解控制

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Execution Ctrl，弹出图 15-11 所示的时间步控制设置面板，设置时间步控制方式为用户定义（User defined），设置输出控制方式为时间步（Time Steps），单击 OK 按钮。

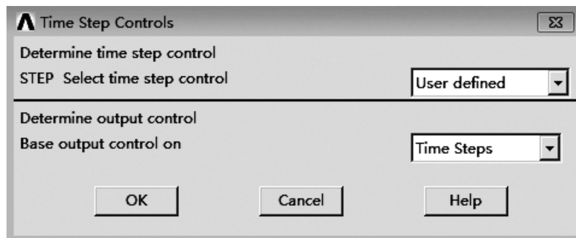


图 15-11　时间步控制设置面板

弹出图 15-12～图 15-14 所示的瞬态求解中的求解时间、迭代和结果输出设置面板，设置用户定义时间步（User-defined time step）为 0.01，时间步数（Number of time steps）为 900，求解终止时间（Stop time）为 9，设置每个时间点的总体迭代次数（Global iter per time step）为 4，设置计算结果每隔 0.02s 输出一次（Append frequency to results file），单击 OK 按钮。

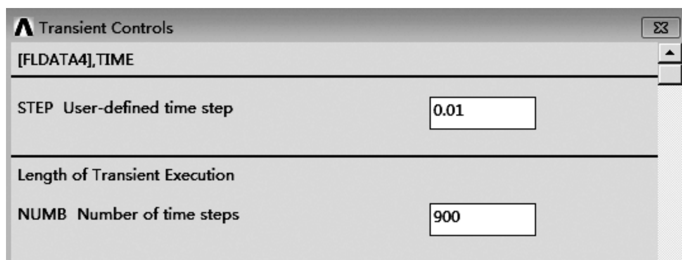


图 15-12 瞬态控制中求解时间设置面板

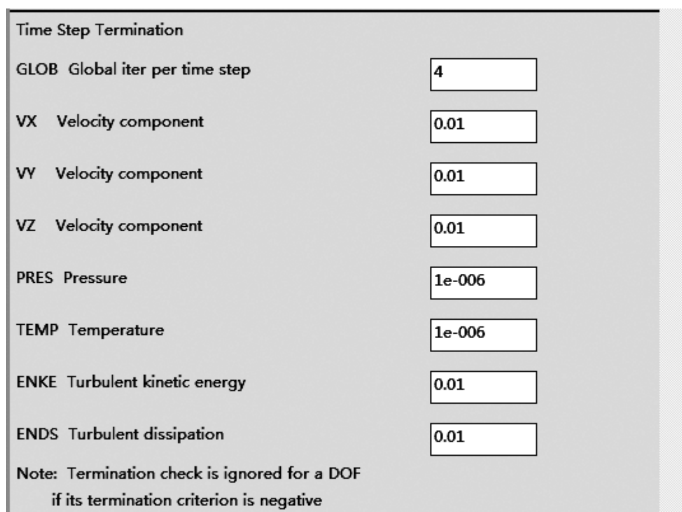


图 15-13 瞬态控制中迭代设置面板

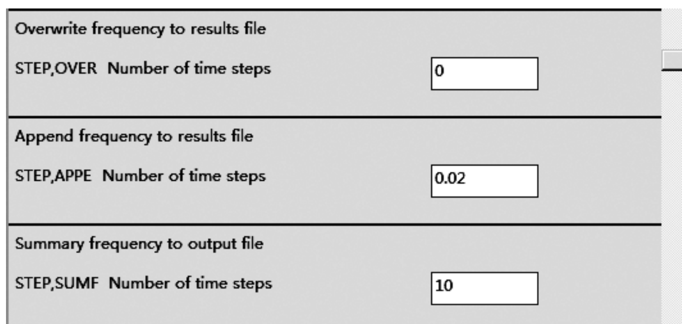


图 15-14 瞬态控制中结果输出设置面板

5．设置计算结果输出

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Additional Out | RFL Out Derived，弹出图 15-15 所示的导出量输出控制面板，勾选面板上的所有选项，单击 OK 按钮。

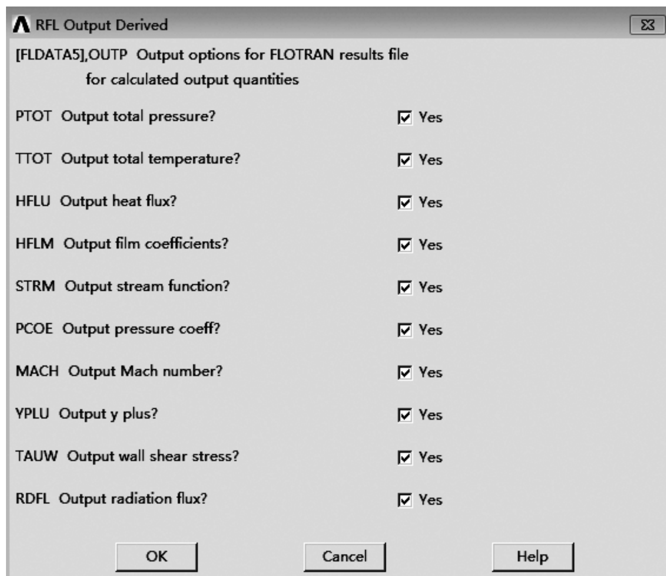


图 15-15 导出量输出控制面板

6．设置流体属性参数

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Fluid Properties，弹出图 15-16 所示的流体属性参数设置面板，设置密度选项为常数（Constant），设置粘度选项为常数（Constant），单击 OK 按钮，弹出图 15-17 所示的计算流体属性设置面板，设置空气密度为 1，粘度为 1×10^{-6}，单击 OK 按钮。

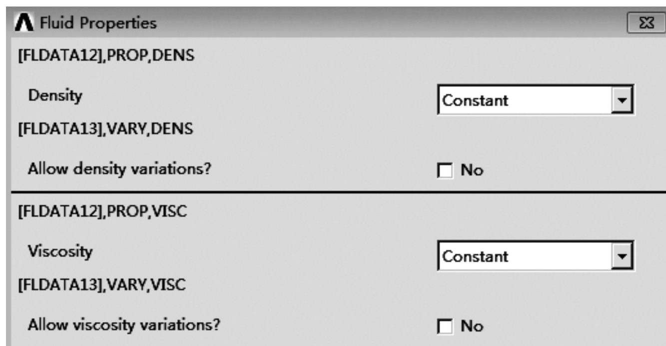


图 15-16 流体属性参数设置面板

7．设置流体环境

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Flow Enviroement | Gravity，弹出图 15-18 所示的流体重力设置面板，因为考虑流体竖直向下的重力，因此设置 *Y* 方向加速度为 9.8，单击 OK 按钮。

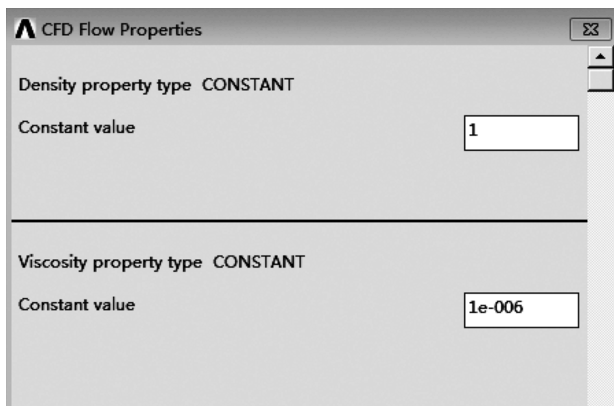


图 15-17 计算流体属性设置面板

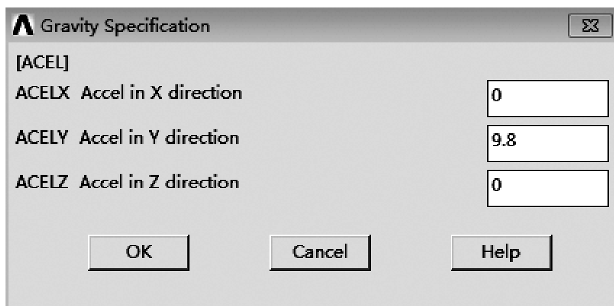


图 15-18 流体重力设置面板

8．设置流体松弛/稳定参数

（1）设置流体求解稳定参数

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Relax/Stab/Cap | Stability Parms，弹出图 15-19 所示的流体求解稳定参数设置面板，设置人工阻尼（Artificial viscosity）为 0.25，单击 OK 按钮。

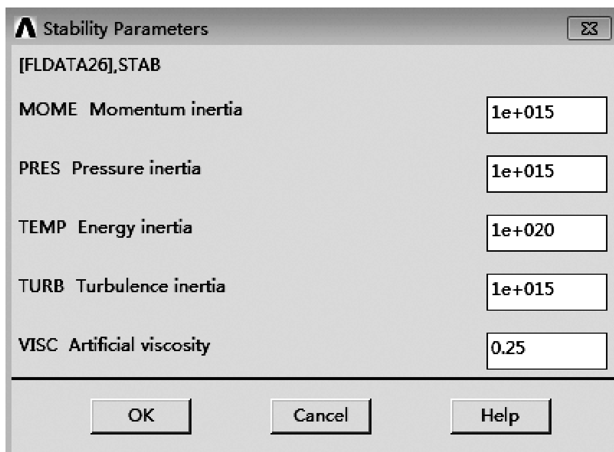


图 15-19 流体求解稳定参数设置面板

（2）设置流体求解自由度松弛参数

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Relax/Stab/Cap | DOF Relaxation，弹出图 15-20 所示的流体求解自由度松弛参数设置面板，设置压力松弛系数为 1.0，单击 OK 按钮。

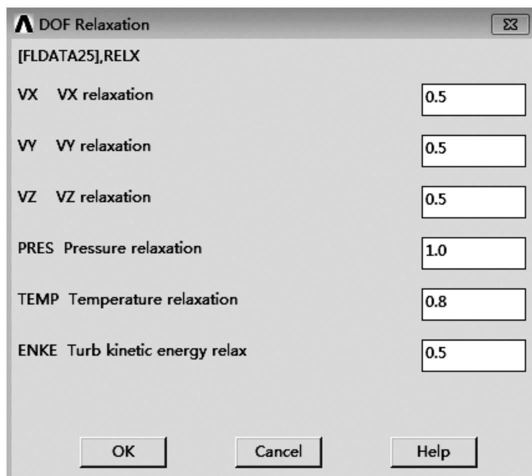


图 15-20　流体求解自由度松弛参数设置面板

9．设置流体湍流模型

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Turbulence | Turbulence Model，弹出图 15-21 所示的流体湍流模型设置面板，选择湍流模型为 RNG，单击 OK 按钮，弹出 RNG 湍流模型相应的计算参数设置面板，保持默认设置，单击 OK 按钮。

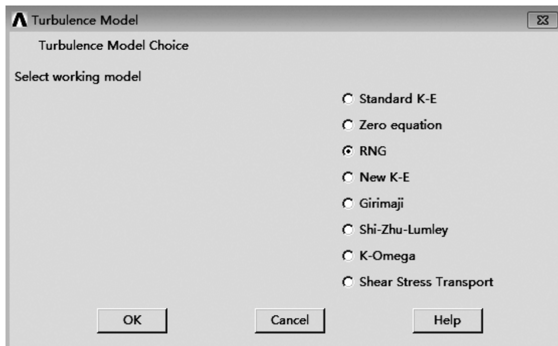


图 15-21　流体湍流模型设置面板

10．设置瞬态求解算法

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Transient Ctrl | Time Integration，弹出图 15-22 所示的瞬态求解算法设置面板，设置算法为纽马克法（Newmark），单击 OK 按钮。

11．关闭并行运算功能

由于 VOF 求解不支持并行计算，因此需要使用下列命令流关闭并行运算功能：

```
PSCONTROL,ALL,OFF
```

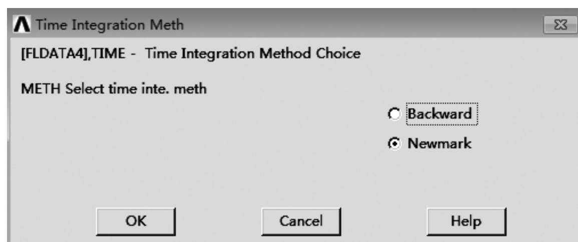


图 15-22　瞬态求解算法设置面板

12．求解

GUI：Main Menu｜Solution｜Run FLOTRAN，开始求解。

15.2.3 后处理

图 15-23～图 15-34 所示为不同时刻的流体体积分数的云图，由图可知，开闸后水撞击障碍物 1 后，发生了溅起的现象，然后再撞击障碍物 2。图 15-35 和图 15-36 所示为 1722 节点处 *X* 方向和 *Y* 方向速度与时间的关系。具体的操作方法，用户详见本章的视频操作。

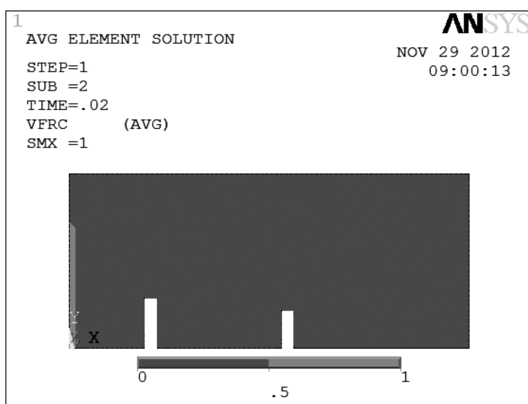


图 15-23　0.02s 时刻的流体体积分数云图

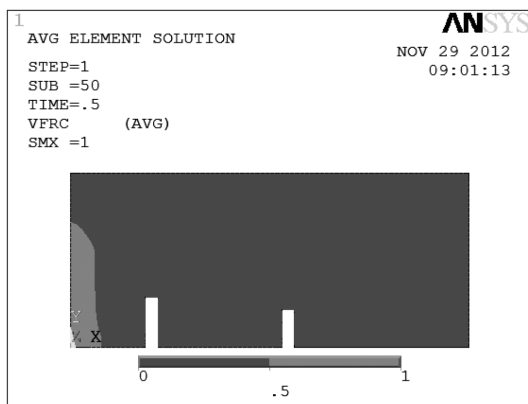


图 15-24　0.5s 时刻的流体体积分数云图

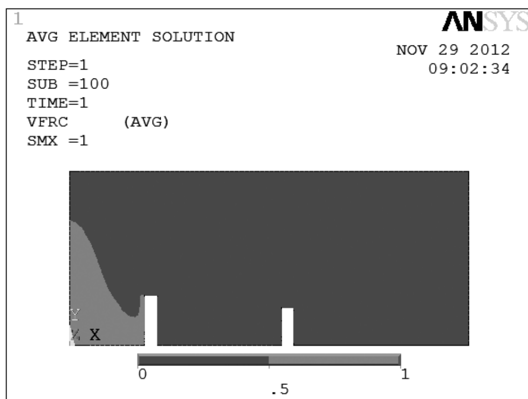


图 15-25　1s 时刻的流体体积分数云图

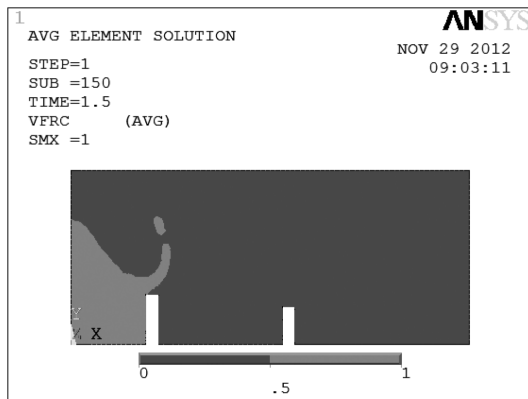


图 15-26　1.5s 时刻的流体体积分数云图



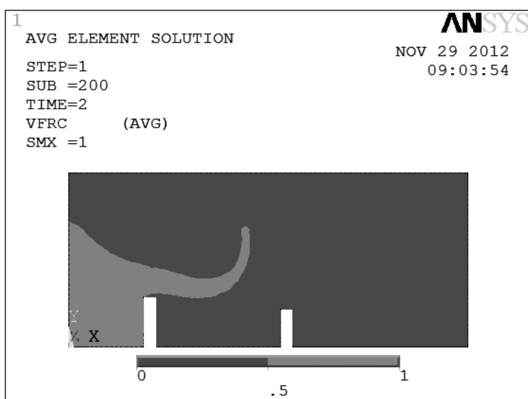


图 15-27　2s 时刻的流体体积分数云图

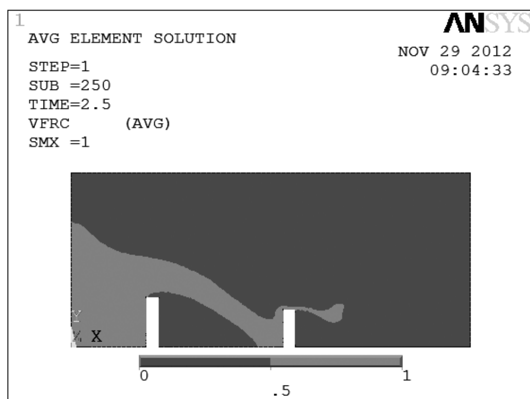


图 15-28　2.5s 时刻的流体体积分数云图

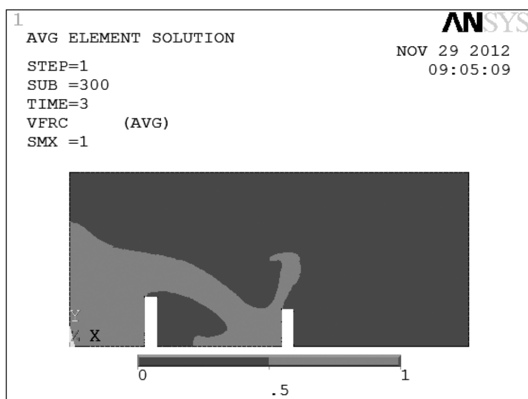


图 15-29　3s 时刻的流体体积分数云图

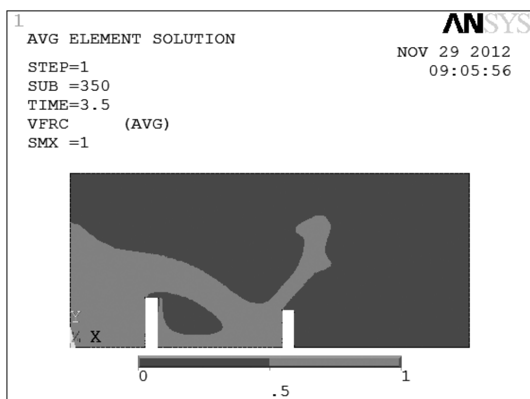


图 15-30　3.5s 时刻的流体体积分数云图

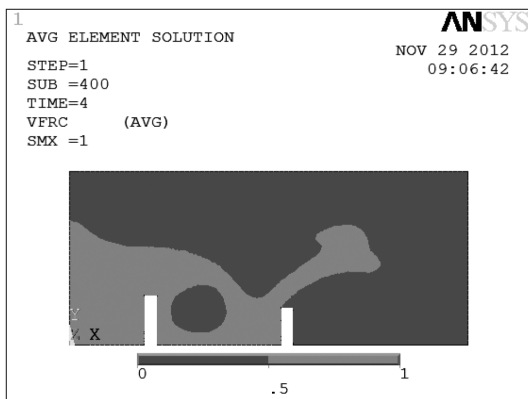


图 15-31　4s 时刻的流体体积分数云图

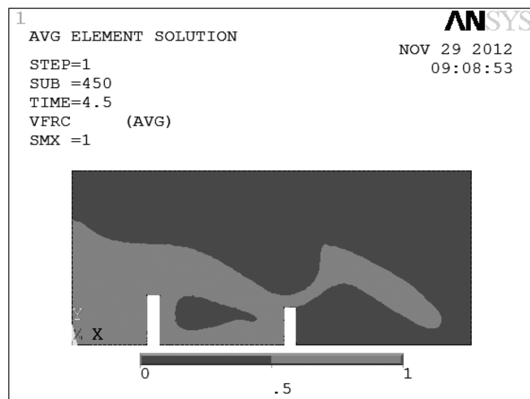


图 15-32　4.5s 时刻的流体体积分数云图

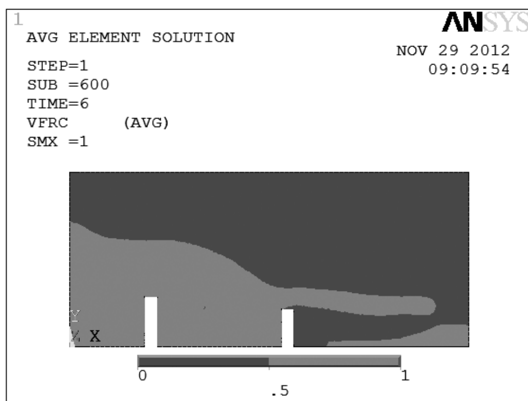


图 15-33 6s 时刻的流体体积分数云图

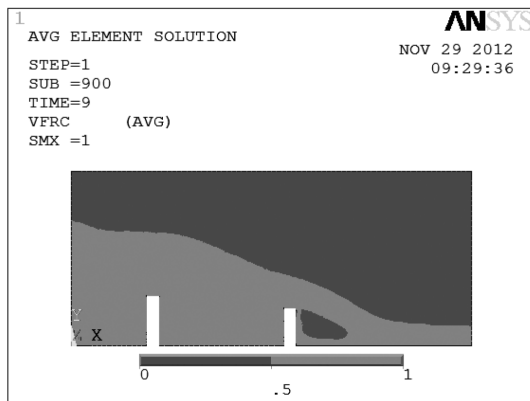


图 15-34 9s 时刻的流体体积分数云图

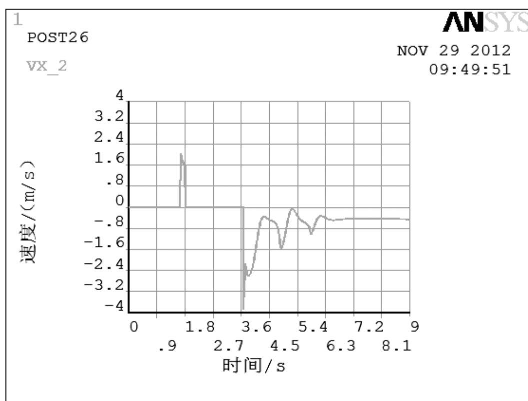


图 15-35 1722 节点处 *X* 方向速度与时间的关系

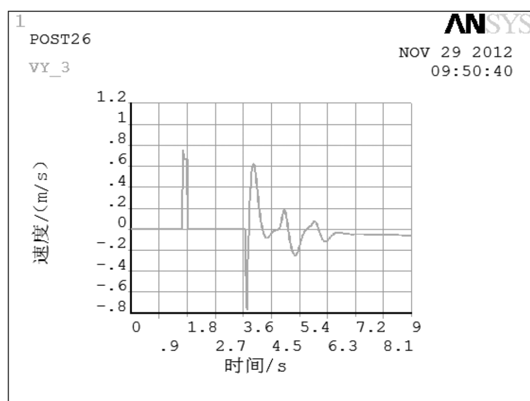


图 15-36 1722 节点处 *Y* 方向速度与时间关系

15.3 命令流

```
/FILNAME,Gate VOF analysis,0
/PREP7
!定义流体单元
ET,1,141
!建立模型
K,1,0,0,0
K,2,3,0,0
K,3,3,2,0
K,4,3.5,2,0
K,5,3.5,0,0
K,6,8.5,0,0
K,7,8.5,1.5,0
K,8,9,1.5,0
K,9,9,0,0
K,10,16,0,0
```

```
K,11,16,5,0
K,12,16,7,0
K,13,0,7,0
K,14,0,5,0
!使用关键点建立面
A,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14
!划分网格
LESIZE,2,,,60
LESIZE,3,,,20
LESIZE,4,,,60
LESIZE,6,,,50
LESIZE,7,,,20
LESIZE,8,,,50
ESIZE,0.2 !设置总体网格尺寸
AMESH,1
!进入求解
/SOL
!定义边界条件
DL,14, ,VX,1.5,1
DL,14, ,VY,0,1
DL,14, ,VZ,0,1
!定义 VOF 载荷
sfl,14,vfrc,1,,1
!定义无滑移壁面条件
DL,1, ,VX,0,1
DL,1, ,VY,0,1
DL,1, ,VZ,0,1
DL,2, ,VX,0,1
DL,2, ,VY,0,1
DL,2, ,VZ,0,1

DL,3, ,VX,0,1
DL,3, ,VY,0,1
DL,3, ,VZ,0,1
DL,4, ,VX,0,1
DL,4, ,VY,0,1
DL,4, ,VZ,0,1
DL,5, ,VX,0,1
DL,5, ,VY,0,1
DL,5, ,VZ,0,1
DL,6, ,VX,0,1
DL,6, ,VY,0,1
DL,6, ,VZ,0,1
DL,7, ,VX,0,1
DL,7, ,VY,0,1
DL,7, ,VZ,0,1
DL,8, ,VX,0,1
```



```
DL,8, ,VY,0,1
DL,8, ,VZ,0,1
DL,9, ,VX,0,1
DL,9, ,VY,0,1
DL,9, ,VZ,0,1
!设置流体求解选项
FLDA,SOLU,VOF,ON
FLDA,SOLU,FLOW,ON
FLDA,SOLU,TRAN,ON
FLDA,SOLU,TURB,ON
!设置求解控制
FLDA,TIME,GLOB,4
FLDA,TIME,NUMB,900
FLDA,TIME,STEP,1.0E-2
FLDA,TIME,APPE,0.02
FLDA,TIME,PRES,1.0E-6
!设置计算结果输出
FLDATA5,OUTP,PTOT,1
FLDATA5,OUTP,TTOT,1
FLDATA5,OUTP,HFLU,1
FLDATA5,OUTP,HFLM,1
FLDATA5,OUTP,STRM,1
FLDATA5,OUTP,PCOE,1
FLDATA5,OUTP,MACH,1
FLDATA5,OUTP,YPLU,1
FLDATA5,OUTP,TAUW,1
FLDATA5,OUTP,RDFL,1
!设置流体属性参数
flda,prot,dens,constant
flda,prot,visc,constant
flda,nomi,dens,1000
flda,nomi,visc,1.0E-6
!设置考虑流体重力
acel,0.0,9.8,0.0
!设置流体松弛/稳定参数
FLDATA26,STAB,VISC,0.25,
flda,relx,pres,1.0
!选择流体湍流模型
FLDATA24,TURB,MODL,3
!设置瞬态求解算法
FLDATA4,TIME,METH,NEWM
FLDATA4,TIME,DELTA,0.5,
!关闭并行运算功能
PSCONTROL,ALL,OFF
!开始求解
SOLVE
```

第 16 章　喷管三维流场分析

16.1　问题的描述

16.1.1 几何模型

图 16-1 所示为喷管的二维轴对称模型简图，图中给出了喷管的几何尺寸，其中进口段的长度为 130mm，出口段的长度为 70mm，出口的角度为 5°。图 16-2 所示为喷管的三维模型。

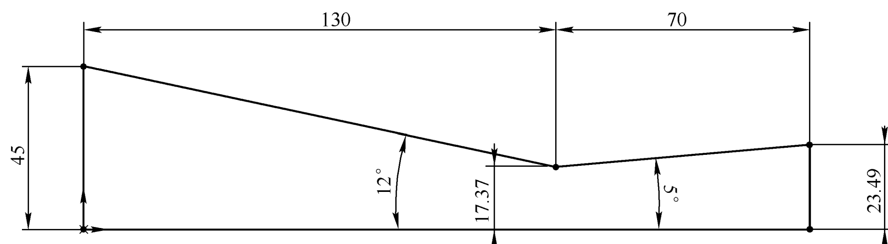


图 16-1　喷管的二维轴对称模型简图

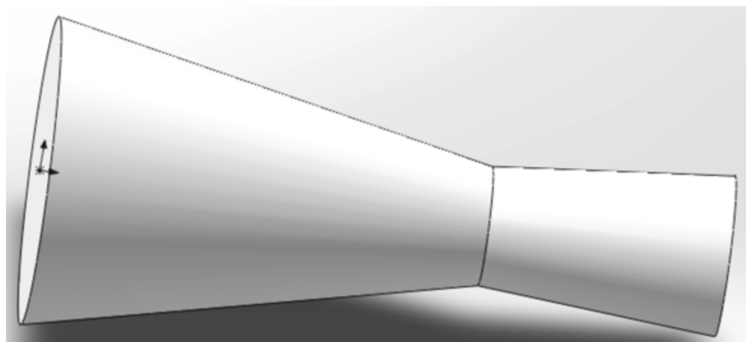


图 16-2　喷管的三维模型

16.1.2 流体属性参数

该实例的流体介质为空气，因为不考虑温度，因此只需要给出流体的密度和粘度。选择流体的密度和粘度都为 AIR-SI。

16.1.3 选择单元

本实例选用二维流体单元 FLUID141 和三维流体单元 FLUID142。

16.1.4 流体流动模型

该实例假设流体的流动状态为湍流，并且使用 RNG 湍流模型。



16.1.5 边界条件及载荷

假设入口处是由空压站传来的高压低速气体，因此设置喷管入口处的速度为 0，压力为 1MPa，入口温度为室温 20°，喷管的管壁采用无滑移边界，出口压力设计背压为 0.005MPa。

16.2 GUI 操作

16.2.1 前处理

1．定义文件名

GUI：Utility Menu | File | Change Jobname，弹出一个对话框，在文本框中输入“Nozzle flow field analysis”，单击 OK 按钮。

2．选择单元

GUI：Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击 Add 按钮，弹出图 16−3 所示的选择单元对话框，选择左侧中的 FLOTRAN CFD 项，然后在右边选择 2D FLOTRAN 141 项，单击 Apply 按钮，继续在左侧选择 FLOTRAN CFD 项，然后再右边选择 3D FLOTRAN 142 项，单击 OK 按钮。

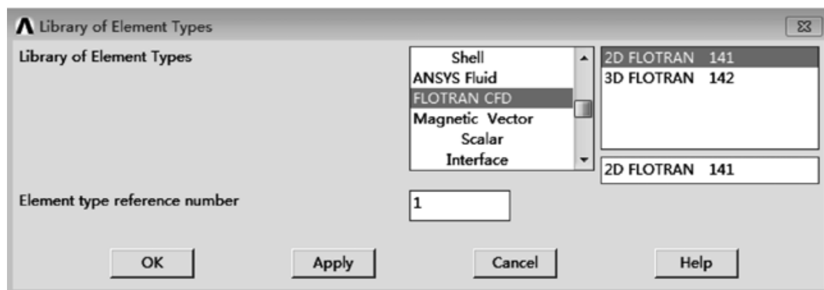


图 16−3　选择单元对话框

3．建立模型

（1）定义关键点

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS，弹出图 16−4 所示的在激活坐标系中定义关键点面板，在面板中关键点号（Keypoint number）文本框中输入“1”，在激活的坐标系中设置 X=0、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 2，X=0.2、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 3，X=0.2、Y=0.02349、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 4，X=0.13、Y=0.01137、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 5，X=0、Y=0.045、Z=0，单击 OK 按钮。



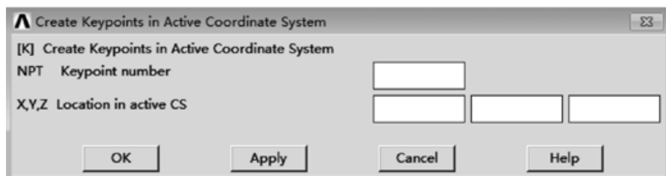


图 16-4 在激活坐标系中定义关键点面板

（2）定义面

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Create｜Areas｜Arbitrary｜Through KPs，弹出“拾取”对话框，在对话框中设置关键点编号为 1、2、3、4 和 5，单击 OK 按钮。

4．网格划分

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Meshing｜MeshTool

（2）设置单元数量

选择网格划分工具面板上的尺寸控制（Size Controls）中的 Lines，单击 Set 按钮，弹出“拾取”对话框，选择线 L4，单击 OK 按钮，弹出图 16-5 所示的线网格设置面板，设置网格数量（No. of element divisions）为 90，空间比例（Spacing ratio）为 5，单击 Apply 按钮，弹出“拾取”对话框，继续拾取线 L3，单击 OK 按钮，弹出图 16-5 所示的线网格设置面板，设置网格数量为 90，空间比例（Spacing ratio）为 0.2，单击 OK 按钮。

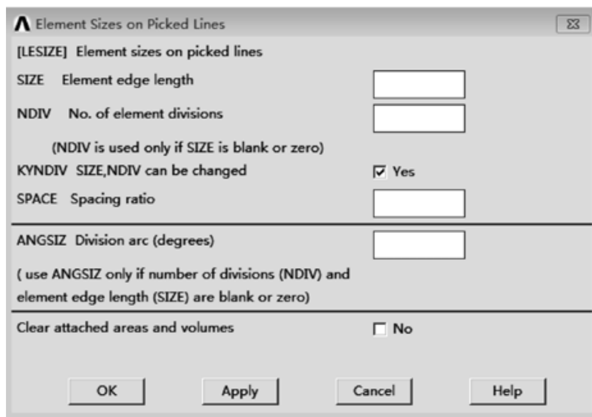


图 16-5 线网格设置面板

（3）设置总体网格尺寸

选择图 16-6 所示的网格划分工具面板中尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设置（Set）按钮，弹出图 16-7 所示的总体网格尺寸设置面板。

该设置面板中存在两个控制选项，即单元尺寸控制（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸文本框中输入“0.002”，单击 OK 按钮。

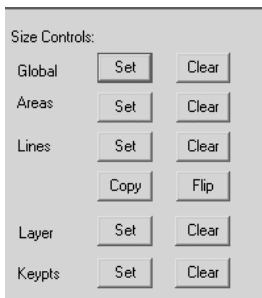


图 16-6 网格划分工具面板中尺寸控制子面板

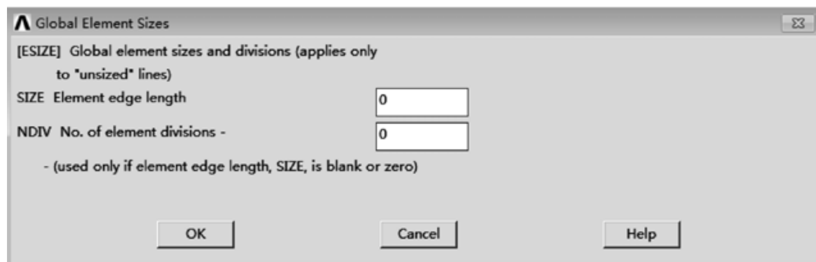


图 16-7 总体网格尺寸设置面板

（4）划分网格

选择网格划分工具面板上的网格划分（Mesh）按钮，弹出拾取对话框，单击 Pick All 按钮。

（5）设置单元拉伸选项

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Extrude | Elem Ext Opts，弹出图 16-8 所示的单元拉伸选项，设置单元类型号为 2 FLUID142，单元数量（No. Elem divs）为 18，其他选项保持默认，单击 OK 按钮。

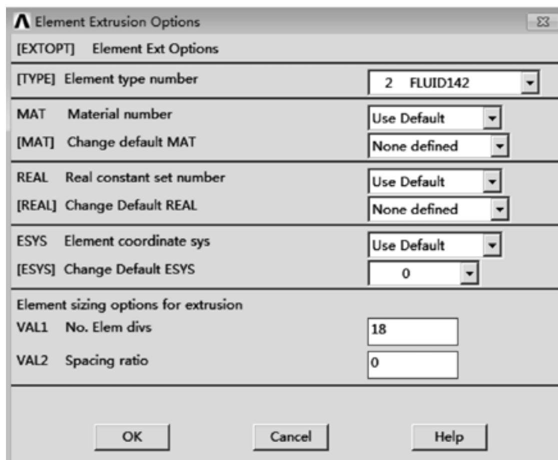


图 16-8 单元拉伸选项

（6）将面网格旋转成体网格

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Extrude | Areas | About Axis，弹出拾取对话框，单击 Pick All 按钮，继续拾取关键点 1 和 2，单击 OK 按钮，弹出图 16-9 所示的关于旋转面的设置面板，输入体的片段数为 4，单击 OK 按钮。

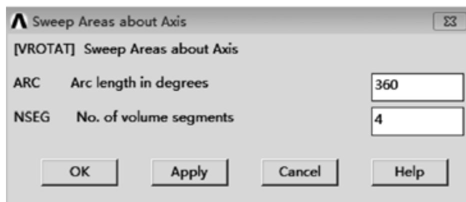


图 16-9 关于轴旋转面的设置面板

16.2.2 求解

1．定义流体边界条件

（1）定义壁面条件

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Areas，弹出拾取对话框，拾取线 A4、A3、A9、A8、A14、A13、A19、A18、A5、A10、A15 和 A20，单击 OK 按钮，弹出图 16−10 所示的在面处施加速度设置面板，设置 VX=0、VY=0 和 VZ=0，单击 OK 按钮。

（2）定义喷管的入口温度

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Thermal | Temperature | On Areas，弹出拾取对话框，拾取喷管的进口面 A5、A10、A15 和 A20，弹出图 16−11 所示的在面处施加温度的设置面板，选择约束的自由度类型为温度（TEMP），设置约束值为 293，单击 OK 按钮。

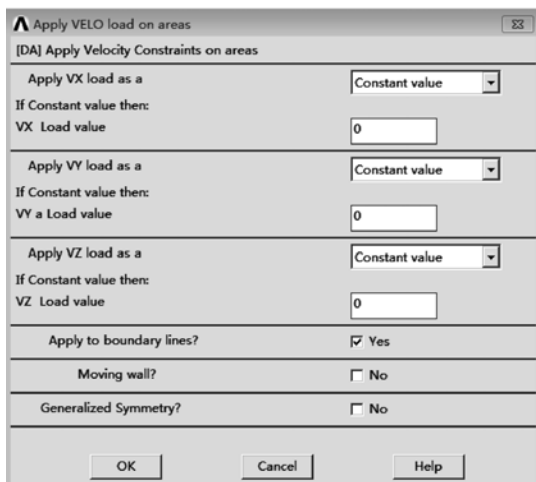


图 16−10　在面处施加速度设置面板

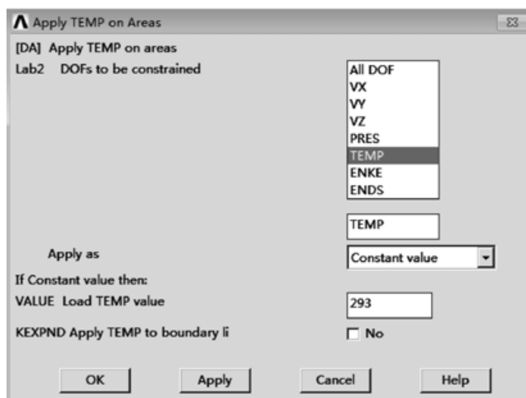


图 16−11　在面处施加温度的设置面板

（3）定义喷管的入口压力

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Pressure DOF，弹出拾取对话框，拾取喷管的入口面 A5、A10、A15 和 A20，弹出图 16−12 所示的在面处定义压力的设置面板，设置压力值为 1×10^6，单击 OK 按钮。

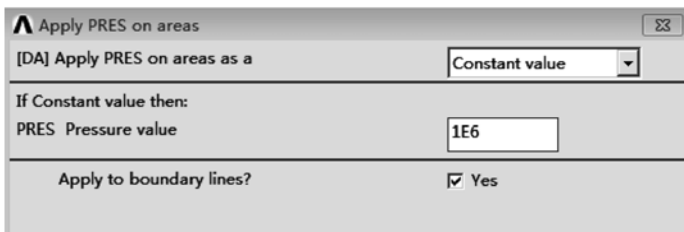


图 16−12　在面处定义压力的设置面板

（4）定义喷管的出口压力

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Pressure DOF，弹出拾取对话框，拾取喷管的出口面 A2、A7、A12 和 A17，弹出图 16−12 所示的在面处定义压力的设置面板，设置压力值为 0.005×10^{-6}，单击 OK 按钮。

2．设置流体求解选项

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Solution Options，弹出图 16−13 所示的流体求解选项设置面板，设置绝热或热选项为 Thermal，设置 TURB 为 Turbulent，即流体流动状态为湍流，设置流体为可压缩流体，其他选项保持默认值，单击 OK 按钮。

3．设置求解控制

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Execution Ctrl，弹出图 16−14 所示的稳态流体求解控制设置面板，设置总体迭代次数（Global iterations）为 20，单击 OK 按钮。

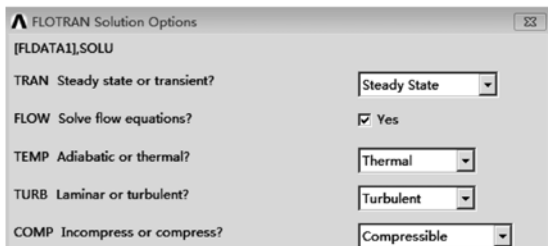


图 16−13 流体求解选项设置面板



图 16−14 稳态流体求解控制设置面板

4．设置计算结果输出

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Additional Out | RFL Out Derived，弹出图 16−15 所示的导出量输出控制面板，勾选面板上的所有选项，单击 OK 按钮。

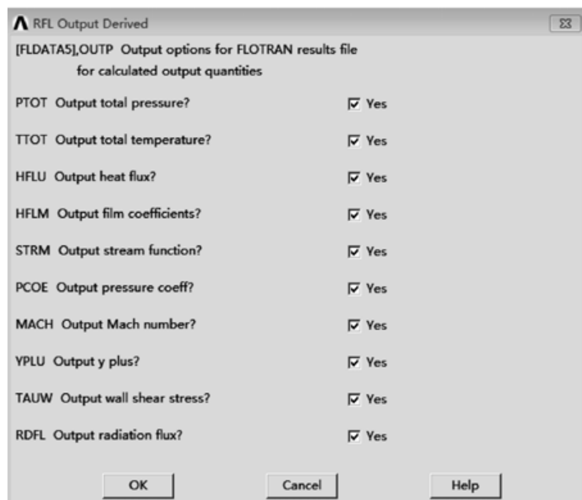


图 16−15 导出量输出控制面板

5．设置流体属性参数

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Fluid Properties，弹出图 16−16 所示的

计算流体属性参数设置面板，设置密度选项为 AIR-SI，设置粘度选项为 AIR-SI，设置导热系数选项为 AIR-SI，设置比热容选项为 AIR-SI，由于空气为可压缩，选择密度为变化（Allow density variations），单击 OK 按钮。

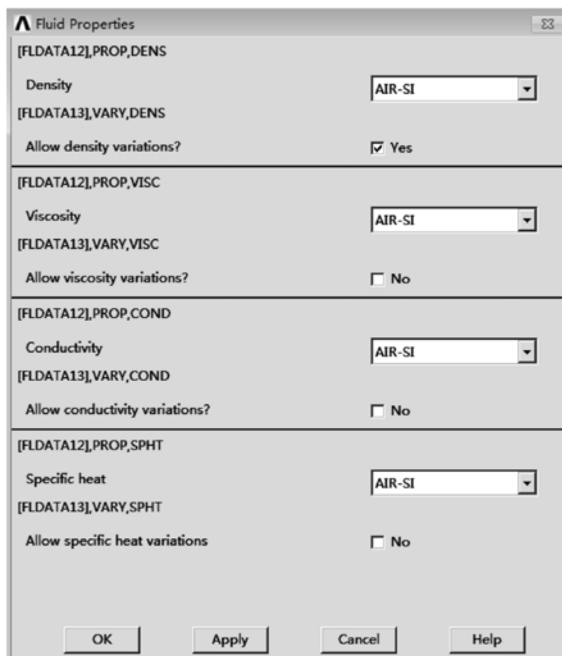


图 16-16　计算流体属性设置面板

6．设置流体求解稳定参数

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Relax/Stab/Cap | Stability Parms，弹出图 16-17 所示的流体求解稳定参数设置面板，设置人工阻尼（Artificial viscosity）为 0.25，单击 OK 按钮。

7．设置流体湍流模型

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Turbulence | Turbulence Model，弹出图 16-18 所示的流体湍流模型设置面板，选择湍流模型为 RNG，单击 OK 按钮，弹出 RNG 湍流模型相应的计算参数设置面板，保持默认设置，单击 OK 按钮。

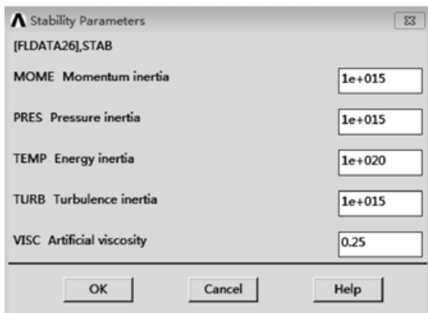


图 16-17　流体求解稳定参数设置面板

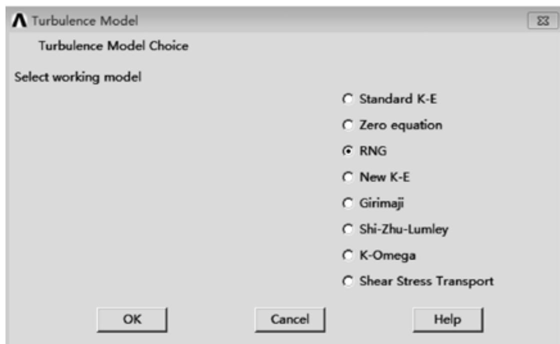


图 16-18　流体湍流模型设置面板

8．求解

GUI：Main Menu｜Solution｜Run FLOTRAN，开始求解。

16.2.3 后处理



图 16-19～图 16-24 所示为喷管的三维模型及剖面的速度、压力、湍流动能和马赫数云图。图 16-25 和图 16-26 所示分别为喷管轴线上压力、速度与距离的关系，其中图中的原点为入口的中心位置，终点为出口中心位置。具体的操作方法，用户详见本章的视频操作。

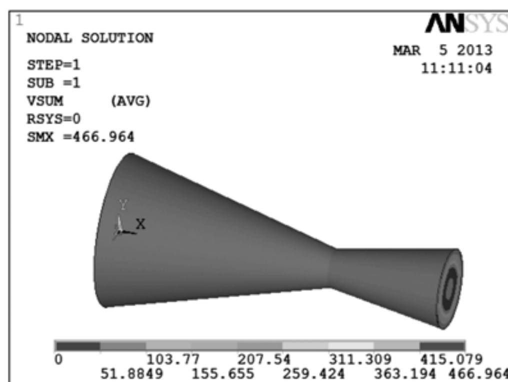


图 16-19 喷管三维模型的速度云图

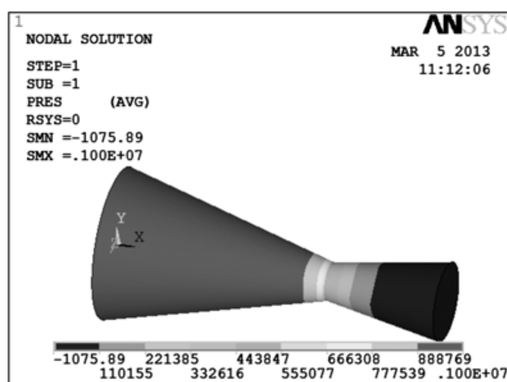


图 16-20 喷管三维模型的压力云图

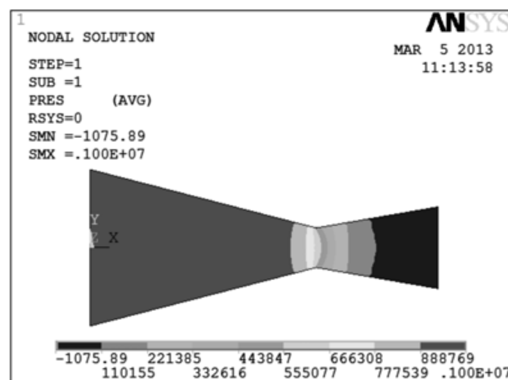


图 16-21 喷管剖面的压力云图

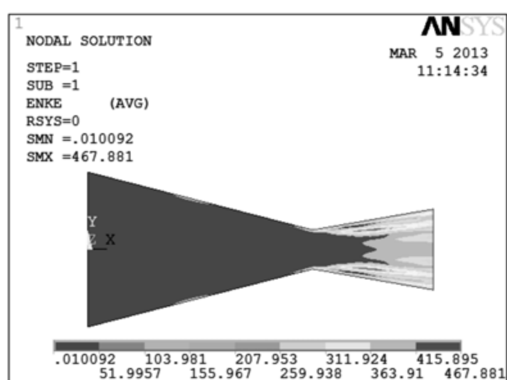


图 16-22 喷管剖面的湍流动能云图

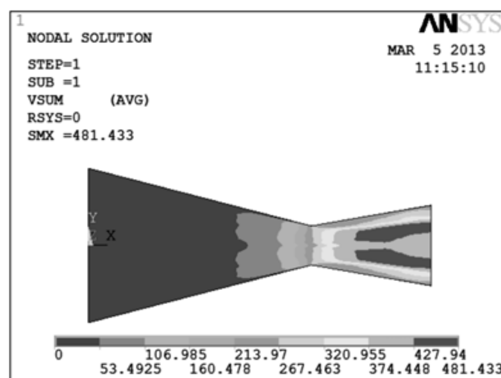


图 16-23 喷管剖面的速度云图

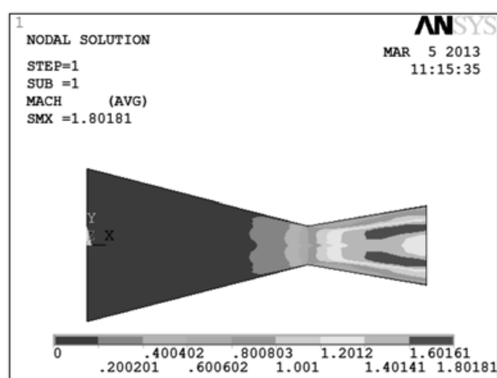


图 16-24 喷管剖面的马赫数云图



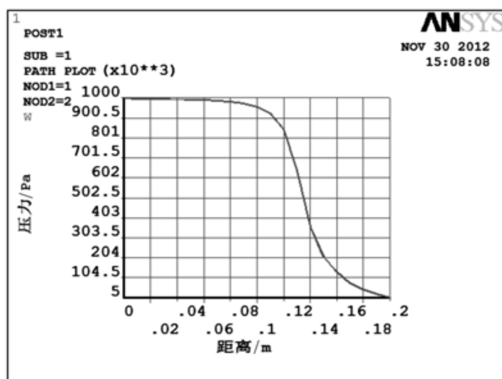


图 16-25　喷管轴线上压力与距离的关系

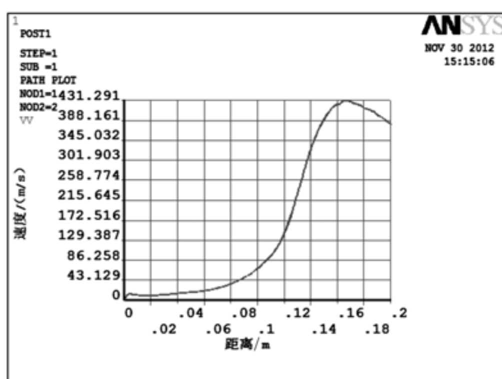


图 16-26　喷管轴线上速度与距离的关系

16.3　命令流

```
/FILNAME,Nozzle flow field analysis,0
/PREP7
!定义流体单元
ET,1,141
ET,2,142
!建立模型
K,1,0,0,0    !定义关键点
K,2,0.2,0,0
K,3,0.2,0.02349,
K,4,0.13,0.01137
K,5,0,0.045,0
!使用关键点定义面板
A,1,2,3,4,5
!划分网格
LESIZE,4, , ,90,1/0.2, , , ,1
LESIZE,3, , ,90,0.2, , , ,1
ESIZE,0.002
AMESH,1
!将面网格旋转形成体单元
TYPE,2
EXTOPT,ESIZE,18,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,1
FLST,8,2,3
FITEM,8,1
FITEM,8,2
VROTAT,P51X, , , , , ,P51X, ,360,4,
!进入求解
```



```
/SOL
!定义无滑移壁面边界条件
DA,4,VX,0,1
DA,4,VY,0,1
DA,4,VZ,0,1

DA,3,VX,0,1
DA,3,VY,0,1
DA,3,VZ,0,1

DA,9,VX,0,1
DA,9,VY,0,1
DA,9,VZ,0,1

DA,8,VX,0,1
DA,8,VY,0,1
DA,8,VZ,0,1

DA,14,VX,0,1
DA,14,VY,0,1
DA,14,VZ,0,1

DA,13,VX,0,1
DA,13,VY,0,1
DA,13,VZ,0,1

DA,19,VX,0,1
DA,19,VY,0,1
DA,19,VZ,0,1

DA,18,VX,0,1
DA,18,VY,0,1
DA,18,VZ,0,1

DA,5,VX,0,1
DA,5,VY,0,1
DA,5,VZ,0,1

DA,10,VX,0,1
DA,10,VY,0,1
DA,10,VZ,0,1

DA,15,VX,0,1
DA,15,VY,0,1
DA,15,VZ,0,1

DA,20,VX,0,1
```

```
DA,20,VY,0,1
DA,20,VZ,0,1
!定义入口温度边界
DA,20,TEMP,293
DA,5,TEMP,293
DA,15,TEMP,293
DA,10,TEMP,293
!定义入口压力边界条件
DA,20,PRES,1E6,1
DA,5,PRES,1E6,1
DA,10,PRES,1E6,1
DA,15,PRES,1E6,1
!定义出口压力边界条件
DA,2,PRES,0.005E6,1
DA,17,PRES,0.005E6,1
DA,7,PRES,0.005E6,1
DA,12,PRES,0.005E6,1
!设置流体求解选项
FLDATA1,SOLU,FLOW,1
FLDATA1,SOLU,TURB,1
FLDATA1,SOLU,COMP,1
FLDATA1,SOLU,TEMP,1
!设置求解控制
FLDATA2,ITER,EXEC,20,
!设置计算结果输出
FLDATA5,OUTP,PTOT,1
FLDATA5,OUTP,TTOT,1
FLDATA5,OUTP,HFLU,1
FLDATA5,OUTP,HFLM,1
FLDATA5,OUTP,STRM,1
FLDATA5,OUTP,PCOE,1
FLDATA5,OUTP,MACH,1
FLDATA5,OUTP,YPLU,1
FLDATA5,OUTP,TAUW,1
FLDATA5,OUTP,RDFL,1
!设置流体属性参数
FLDATA13,VARY,DENS,1
FLDATA7,PROT,DENS,AIR-SI
FLDATA7,PROT,VISC,AIR-SI
FLDATA7,PROT,COND,AIR-SI
FLDATA7,PROT,SPHT,AIR-SI
!设置流体求解稳定参数
FLDATA26,STAB,VISC,0.25,
!选择流体湍流模型
FLDATA24,TURB,MODL,3
!开始求解
SOLVE
```

第 17 章　飞机起飞过程机翼瞬态流场分析



17.1　问题的描述

17.1.1 几何模型

如图 17−1 所示为机翼瞬态流体分析模型，其中机翼的五个坐标分别 *A*(0,0)，*B*(0.4,0)，*C*(4.6,0.04)，*D*(0.38,0.09)，*E*(0.2,0.05)。机翼距后方为 2m，距前方为 13m，*A* 点距地面为 0.8m，距上方为 1.6m。

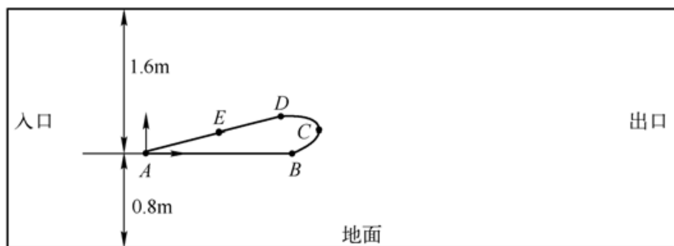


图 17−1　机翼瞬态流场分析模型

17.1.2 流体属性参数

该实例的流体为空气，因为不考虑温度，因此只需要给出流体的密度和粘度。设置流体的密度为 1kg/m^3，粘度为 0.00002kg/(m/s)。

17.1.3 选择单元

本实例选用二维流体单元 FLUID141 单元。

17.1.4 流体流动模型

该实例假设流体的流动状态为湍流，并且使用 RNG 湍流模型。

17.1.5 边界条件及载荷

假设入口的流动速度为 0，压力为 0，并且固定入口位移约束；出口的压力为 0，固定

出口位移约束。假设机翼的 X 方向位移与时间的关系为 $260t^2$，X 方向速度与时间的关系为 $560t$，机翼的壁面为无滑移壁面条件。

17.2 GUI 操作

17.2.1 前处理

1．定义文件名

GUI：Utility Menu｜File｜Change Jobname，弹出一个对话框，在文本框中输入“Flow field analysis of aircraft”，单击 OK 按钮。

2．选择单元

（1）定义单元

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Element Type｜Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击 Add，弹出图 17-2 所示的选择单元对话框，选择左侧中的 FLOTRAN CFD 项，然后在右边选择 2D FLOTRAN 141 项，单击 OK 按钮。

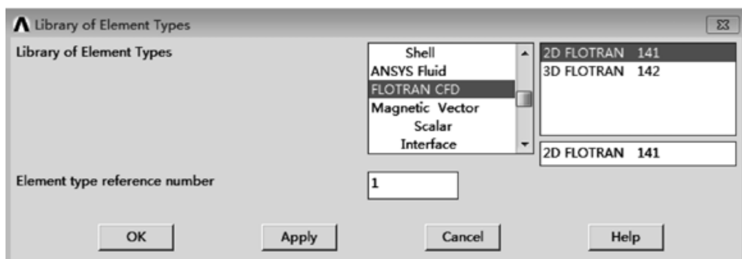


图 17-2　选择单元对话框

（2）设置单元关键字

在单元类型对话框中选择 FLUID141。然后单击 Options 选项，弹出图 17-3 所示的 FULID141 单元关键字设置面板，将支持网格位移自由度选项（Support mesh disp.DOFS）设置为 Yes，单击 OK 按钮，返回单元类型界面，单击 Close 按钮。

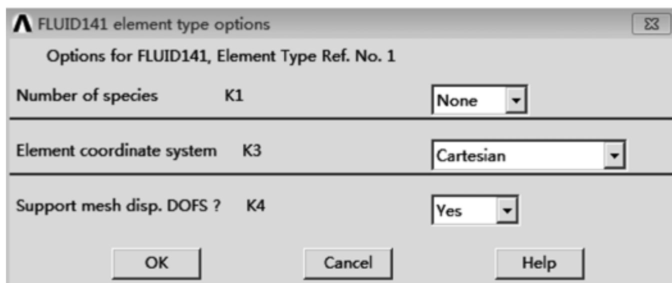


图 17-3　FULID141 单元关键字设置面板

3．建立模型

（1）定义关键点

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Create｜Keypoints｜In Active CS，弹出

图 17−4 所示的在激活坐标系中定义关键点面板，在面板中关键点号（Keypoint number）文本框中输入“1”，在激活的坐标系中设置 X=0、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 2，X=0.4、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 3，X=0.46、Y=0.04、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 4，X=0.38、Y=0.09、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 5，X=0.2、Y=0.05、Z=0，单击 OK 按钮。

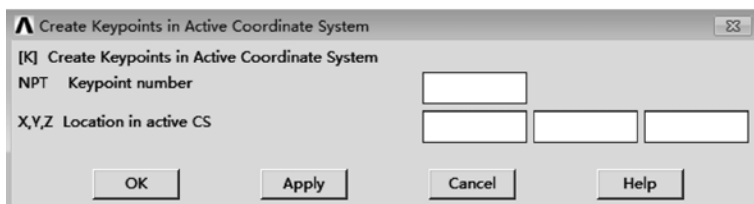


图 17−4 在激活坐标系中定义关键点面板

（2）定义直线

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | Straight Line，弹出拾取对话框，拾取关键点 1 和 2，单击 Apply 按钮，拾取关键点 5 和 1，单击 OK 按钮。

（3）定义样条曲线

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Splines | With Options | Spline thru KPs，弹出拾取对话框，拾取关键点 2、3、4 和 5，单击 OK 按钮，弹出图 17−5 所示的定义样条曲线设置面板，输入开始点的斜率为−1、0、0，输入结束点的斜率为−1、−0.25、0，单击 OK 按钮。

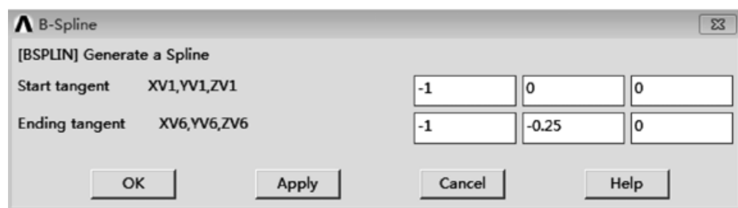


图 17−5 定义样条曲线设置面板

（4）定义面

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By Dimensions，弹出图 17−6 所示的通过尺寸定义矩形设置面板，设置 X1=−2、X2=13、Y1=−0.8、Y2=1.6，单击 OK 按钮。

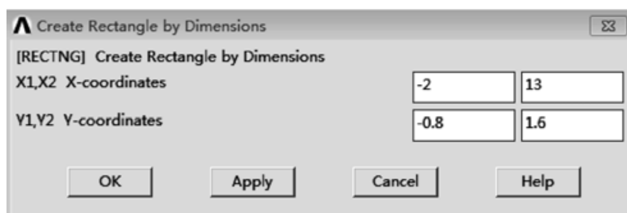


图 17−6 通过尺寸定义矩形设置面板

（5）进行布尔操作

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Booleans｜Subtract｜Areas，弹出拾取对话框，拾取面 A1，单击 Apply 按钮，继续拾取面 A2，单击 OK 按钮。图 17-7 所示为布尔操作后的模型图。

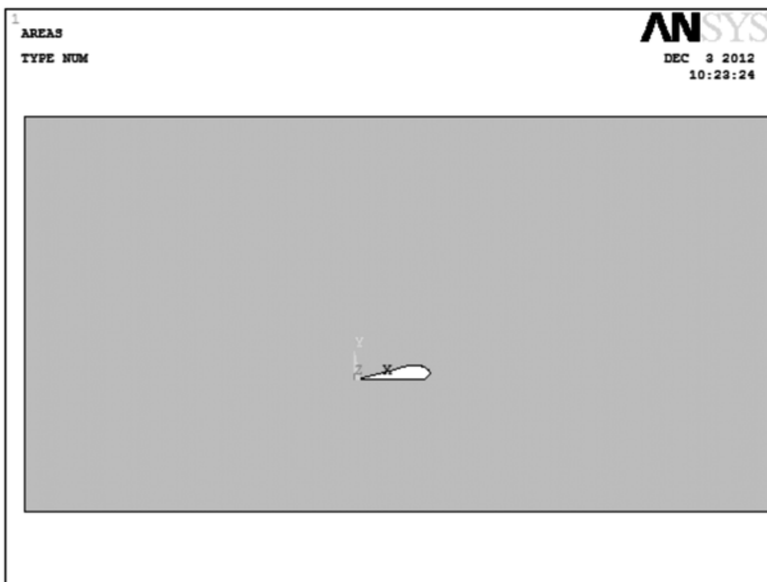


图 17-7　布尔操作后的模型图

4．网格划分

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Meshing｜MeshTool

（2）设置单元数量

选择网格划分工具面板上的尺寸控制（Size Controls）栏中的 Lines 项，单击 Set 按钮，弹出拾取对话框，选择线 L1、L2 和 L3，单击 OK 按钮，弹出图 17-8 所示的线网格设置面板，设置网格数量（No. of element divisions）为 15，单击 OK 按钮。

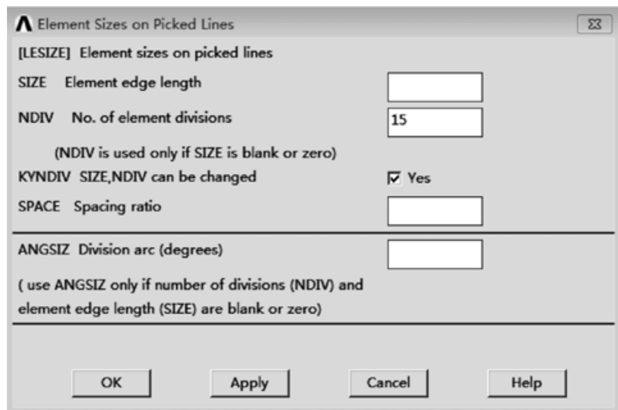


图 17-8　线网格设置面板

（3）设置总体网格尺寸

选择如图 17-9 所示的网格划分工具面板中尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设置（Set）按钮，弹出图 17-10 所示的总体网格尺寸设置面板。

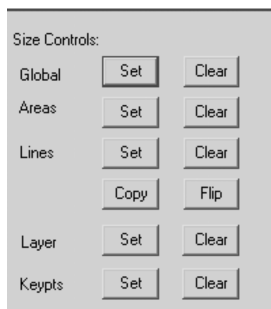


图 17-9 网格划分工具面板中尺寸控制子面板

该设置面板中存在两个控制选项，即单元尺寸控制（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸文本框中输入“0.012”，单击 OK 按钮。

（4）设置网格形状

选择网格划分工具面板上的网格形状为三角形（Tri）。

（5）划分网格

单击网格划分工具面板上的网格划分（Mesh）按钮，弹出拾取对话框，单击 Pick All 按钮。

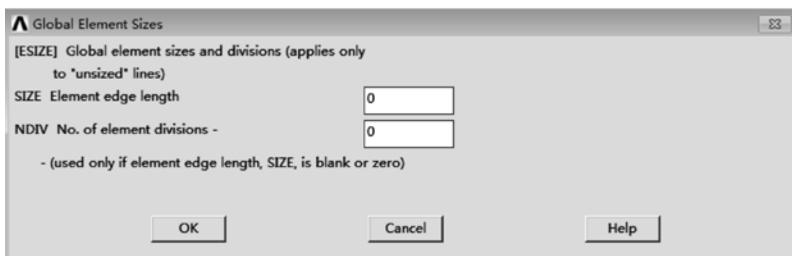


图 17-10 总体网格尺寸设置面板

17.2.2 求解

1．定义流体边界条件

（1）定义入口边界条件

1）定义入口速度。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L7，单击 OK 按钮，弹出图 17-11 所示的在线处施加速度设置面板，设置 VX=0、VY=0 和 VZ=0，单击 OK 按钮。

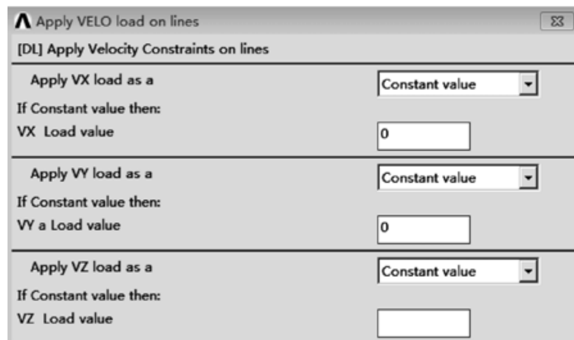


图 17-11 在线处施加速度设置面板

2）定义入口压力。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Pressure DOF | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L7，单击 OK 按钮，弹出图 17-12 所示的在线处施加压力设置面板，设置压力为 0，单击 OK 按钮。

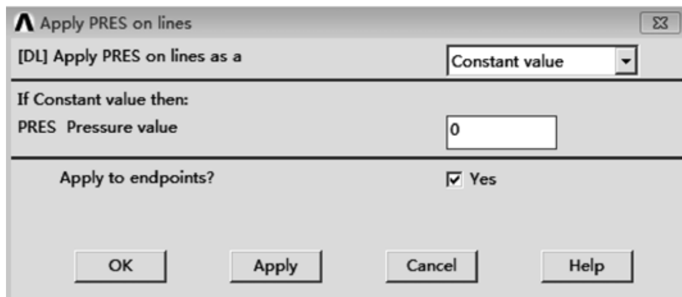


图 17-12　在线处施加压力设置面板

3）定义入口位移约束。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Displacement | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L7，单击 OK 按钮，弹出图 17-13 所示的在线处施加位移约束设置面板，设置 UX=0 和 UY=0，单击 OK 按钮。

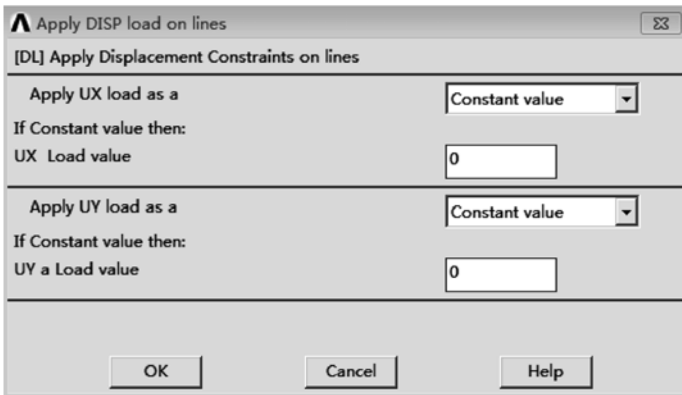


图 17-13　在线处施加位移约束设置面板

（2）定义出口边界条件

1）定义出口压力。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Pressure DOF | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L5，单击 OK 按钮，弹出图 17-12 所示的在线处施加压力设置面板，设置压力为 0，单击 OK 按钮。

2）定义出口位移约束。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Displacement | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L5，单击 OK 按钮，弹出图 17-13 所示的在线处施加位移约束设置面板，设置 UX=0 和 UY=0，单击 OK 按钮。

（3）定义地面边界条件

1）定义地面的速度。

GUI：Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Fluid/CFD｜Velocity｜On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L4，单击 OK 按钮，弹出图 17-11 所示的在线处施加速度设置面板，设置 VX=0、VY=0 和 VZ=0，单击 OK 按钮。

2）定义地面的位移约束。

GUI：Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Fluid/CFD｜Displacement｜On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L4，单击 OK 按钮，弹出图 17-13 所示的在线处施加位移约束设置面板，设置 UX=0 和 UY=0，单击 OK 按钮。

（4）定义顶层空气的边界条件

1）定义顶层空气的速度。

GUI：Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Fluid/CFD｜Velocity｜On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L6，单击 OK 按钮，弹出图 17-11 所示的在线处施加速度设置面板，设置 VY=0，单击 OK 按钮。

2）定义顶层空气的位移约束。

GUI：Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Fluid/CFD｜Displacement｜On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L6，单击 OK 按钮，弹出图 17-13 所示的在线处施加位移约束设置面板，设置 UX=0 和 UY=0，单击 OK 按钮。

（5）定义机翼的位移边界

1）定义函数。

GUI：Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Functions｜Define/Edit，弹出图 17-14 所示的函数编辑器面板，按照图 17-14 输入函数表达式。

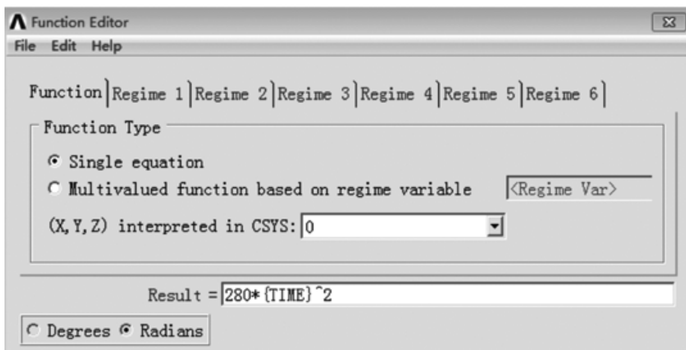


图 17-14　函数编辑器面板

2）保存函数。

选择函数编辑器面板上的菜单命令 File｜Save，弹出保存文件的面板，设置保存的文件名为 S，单击保存按钮。

3）读入函数。

GUI：Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Functions｜Read File，弹出打开文件界面，选择刚保存的文件 S.func，进行打开操作，弹出图 17-15 所示的函数加载器设置面

板，输入表格参数名（Table parameter name）为 S，单击 OK 按钮。

4）定义机翼位移约束。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Displacement | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L1、L2 和 L3，单击 OK 按钮，弹出图 17-16 所示的在线处施加位移约束设置面板，选择 UX 的载荷形式为存在的表格（Existing table），设置 UY=0，单击 OK 按钮，选择存在的表格为 S，单击 OK 按钮。

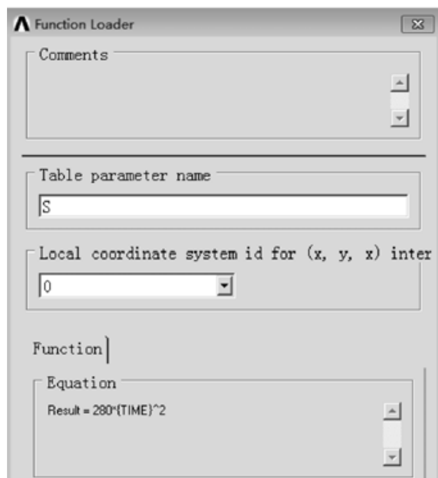


图 17-15　函数加载器设置面板

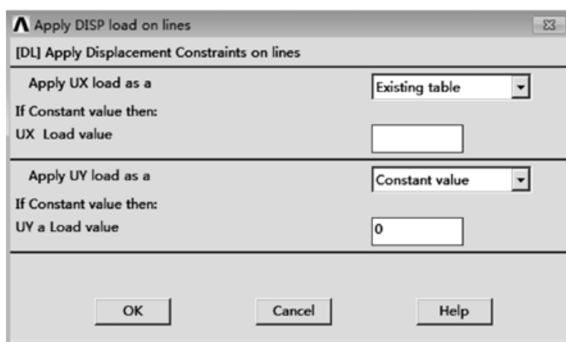


图 17-16　在线处施加位移约束设置面板

（6）定义机翼的壁面无滑移壁面条件

1）定义函数。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Functions | Define/Edit，弹出图 17-17 所示的函数编辑器面板，按照图 17-17 输入函数表达式。

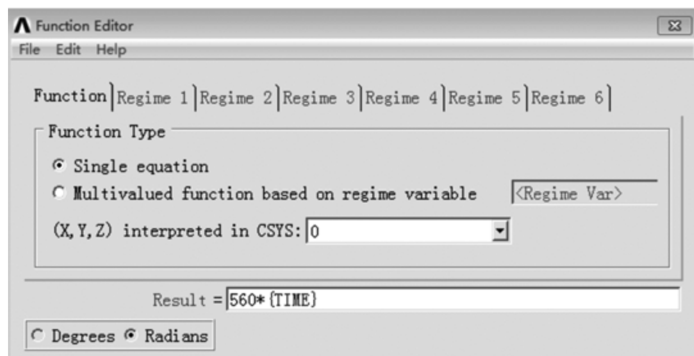


图 17-17　函数编辑器面板

2）保存函数。

选择函数编辑器面板上的菜单命令 File | Save，弹出保存文件的面板，输入保存的文件名为 V，单击“保存”按钮。

3）读入函数。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Functions | Read File，弹出打开文

件界面，选择刚保存的文件 V.func，进行打开操作，弹出图 17-18 所示的函数加载器设置面板，输入表格参数名（Table parameter name）为 V，单击 OK 按钮。

4）定义机翼壁面速度。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L1、L2 和 L3，单击 OK 按钮，弹出图 17-19 所示的在线处施加速度设置面板，选择 VX 的载荷形式为存在的表格（Existing table），设置 VY=0，单击 OK 按钮，选择存在的表格为 V，单击 OK 按钮。

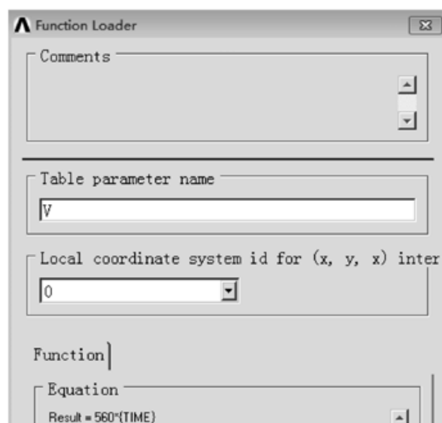


图 17-18 函数加载器设置面板

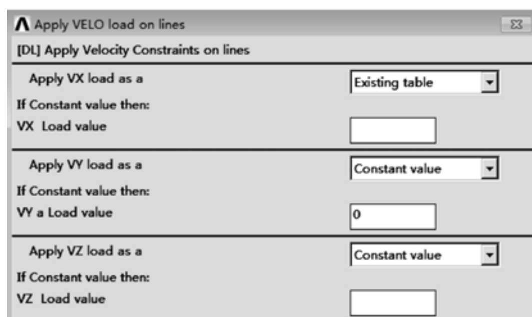


图 17-19 在线处施加速度设置面板

2．设置流体求解选项

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Solution Options，弹出图 17-20 所示的流体求解选项设置面板，设置 TRAN 选项为 Transient，即求解瞬态流体流动问题；设置 TURB 选项为 Turbulent，即流体流动状态为湍流，激活允许网格移动选项（Allow mesh motion），其他选项保持默认值，单击 OK 按钮。

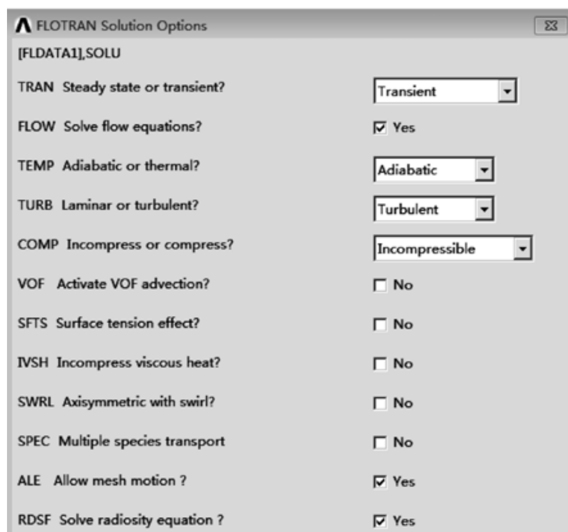


图 17-20 流体求解选项设置面板



3．设置求解控制

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Execution Ctrl，弹出图 17−21 所示的时间步控制设置面板，设置时间步控制方式为用户定义（User defined），设置输出控制方式为时间步（Time Steps），单击 OK 按钮。

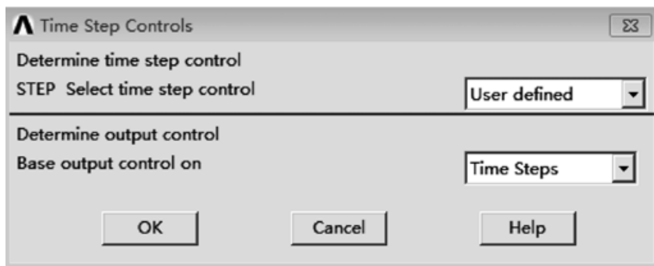


图 17−21 时间步控制设置面板

弹出如图 17−22～图 17−24 所示的瞬态求解中的求解时间、迭代和结果输出设置面板，设置用户定义时间步（User-defined time step）为 0.005，时间步数（Number of time steps）为 34，求解终止时间（Stop time）为 0.17s，设置每个时间点的总体迭代次数（Global iter per time step）为 20，设置计算结果每隔 0.005s 输出一次（Append frequency to results file），单击 OK 按钮。

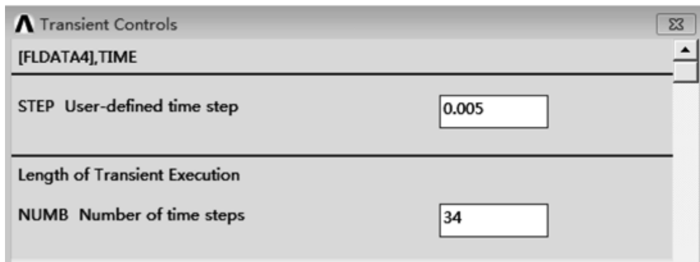


图 17−22 瞬态控制中求解时间设置面板

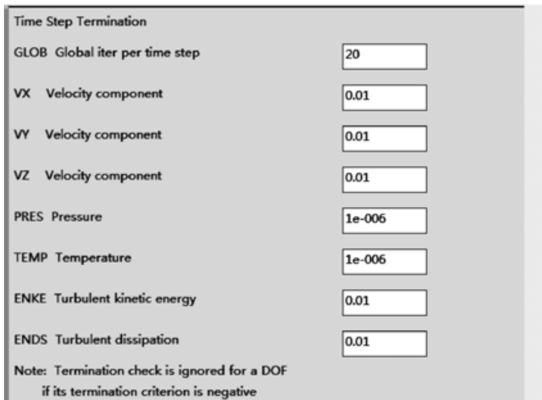


图 17−23 瞬态控制中迭代设置面板

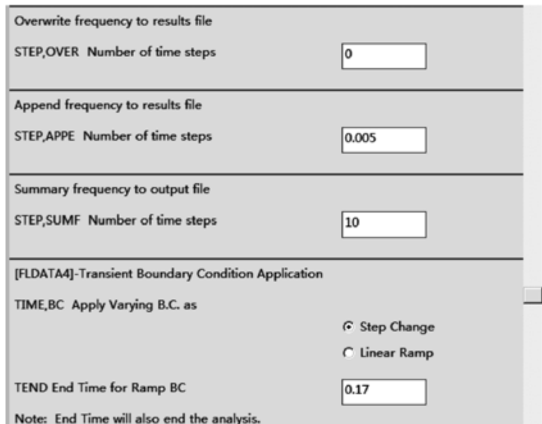


图 17−24 瞬态控制中结果输出设置面板

4．设置计算结果输出

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Additional Out | RFL Out Derived，弹出图 17-25 所示的导出量输出控制面板，勾选面板上的所有选项，单击 OK 按钮。

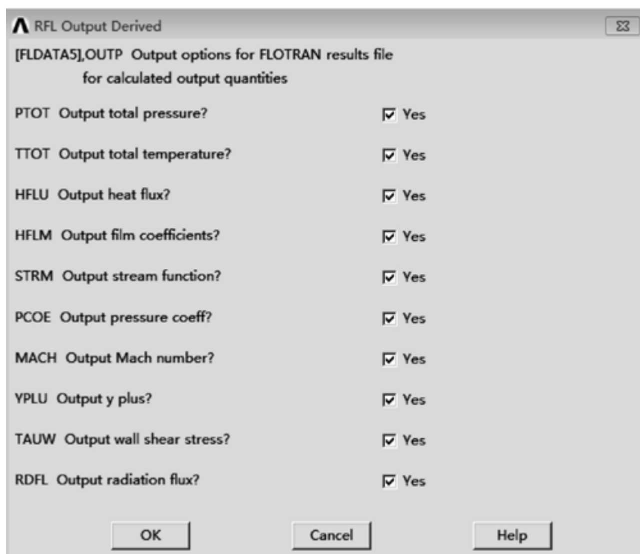


图 17-25 导出量输出控制面板

5．设置流体属性参数

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Fluid Properties，弹出图 17-26 所示的流体属性参数设置面板，设置密度选项为常数（Constant），设置粘度选项为常数（Constant），单击 OK 按钮，弹出图 17-27 所示的计算流体属性设置面板，设置流体密度为 1，粘度为 0.00002，单击 OK 按钮。

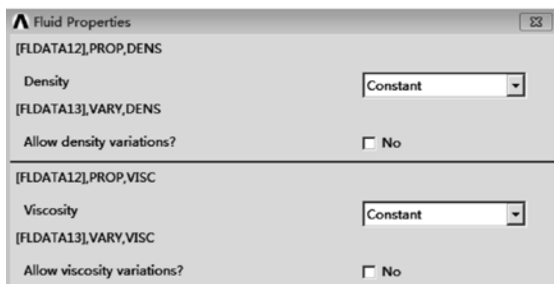


图 17-26 流体属性参数设置面板

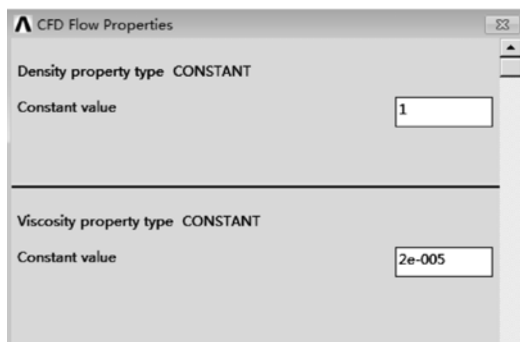


图 17-27 计算流体属性设置面板

6．设置流体环境

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Flow Enviroement | Gravity，弹出图 17-28 所示的流体重力设置面板，因为考虑流体竖直向下的重力，因此设置 *Y* 方向加速度为 9.8，单击 OK 按钮。

7．设置流体求解稳定参数

GUI：Main Menu｜Solution｜FLOTRAN Set Up｜Relax/Stab/Cap｜Stability Parms，弹出图 17-29 所示的流体求解稳定参数设置面板，设置人工阻尼（Artificial viscosity）为 0.25，单击 OK 按钮。

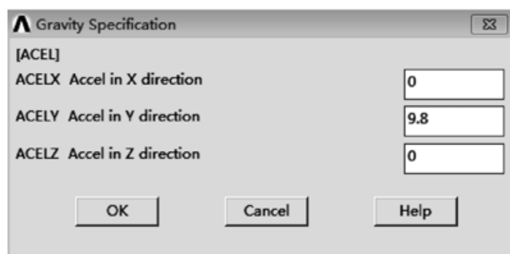


图 17-28　流体重力设置面板

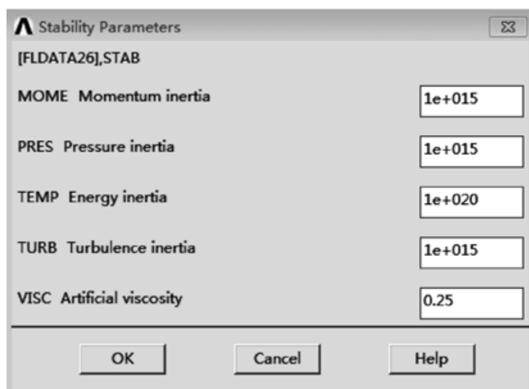


图 17-29　流体求解稳定参数设置面板

8．设置压力方程求解器

GUI：Main Menu｜Solution｜FLOTRAN Set Up｜CFD Solver Controls｜PRES Solver CFD，弹出图 17-30 所示的压力方程求解器设置面板，选择求解方法为 TDMA，单击 OK 按钮，弹出图 17-31 所示的 TDMA 方法迭代次数设置面板，设置迭代次数为 200，单击 OK 按钮。

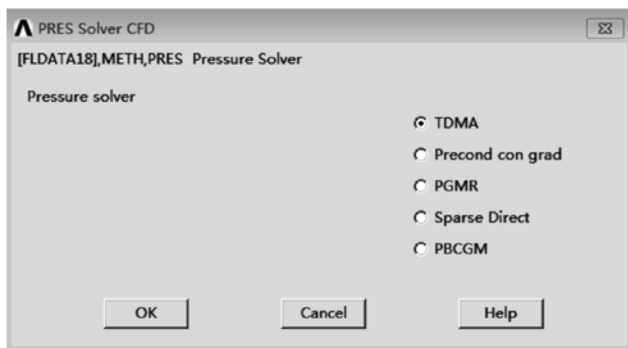


图 17-30　压力方程求解器设置面板

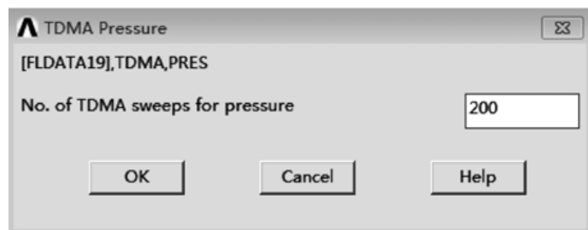


图 17-31　TDMA 方法迭代次数设置面板

9．设置瞬态求解算法

GUI：Main Menu｜Solution｜FLOTRAN Set Up｜Transient Ctrl｜Time Integration，弹出图 17-32 所示的瞬态求解算法设置面板，设置算法为纽马克法（Newmark），单击 OK 按钮。

10．设置网格重分

（1）设置重分单元的范围

GUI：Main Menu｜Solution｜FLOTRAN Set Up｜Remesh Ctrl｜Elements for remesh，弹出图 17-33 所示的设置重分单元范围面板，选择 ALL，单击 OK 按钮。

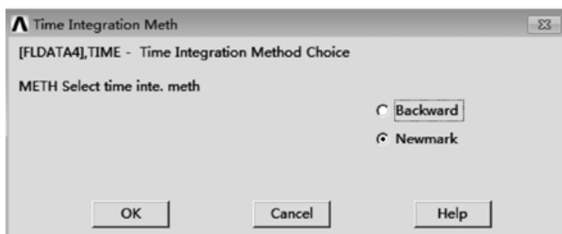


图 17-32　瞬态求解算法设置面板

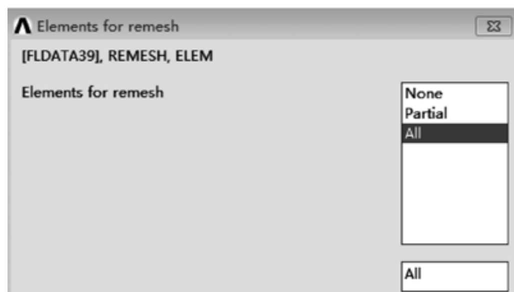


图 17-33　设置重分单元范围面板

（2）设置重分单元尺寸

GUI：Main Menu｜Solution｜FLOTRAN Set Up｜Remesh Ctrl｜Element size ctrl，弹出图 17-34 所示的重分单元尺寸控制设置面板，输入面网格扩展比（Area mesh expansion opt）为 1.4，其他保持默认设置，单击 OK 按钮。

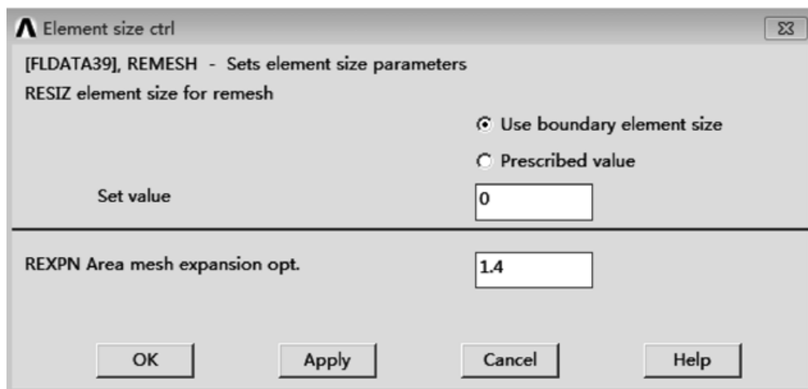


图 17-34　重分单元尺寸控制设置面板

（3）设置重分单元的质量

GUI：Main Menu｜Solution｜FLOTRAN Set Up｜Remesh Ctrl｜Mesh qualities，弹出图 17-35 所示的重分单元网格质量控制面板，设置允许最大长宽比（Allow max aspect ratio）为 40，允许单元体积变化（Allow elem volume change）为 8%，允许长宽比的变化（Allow aspect ratio change）为 40，单击 OK 按钮。

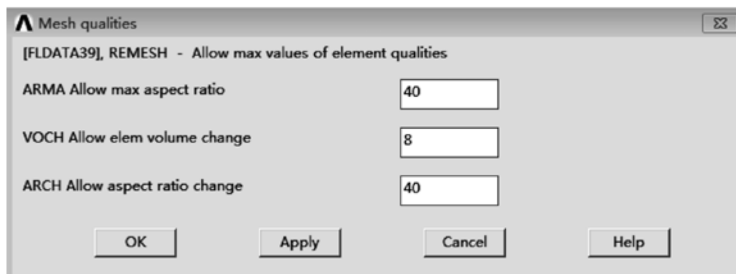


图 17-35　重分单元网格质量控制面板

（4）设置重分单元的频率

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Remesh Ctrl | Remesh frequency，弹出图 17-36 所示的网格重分的频率设置面板，选择网格重分频率为每个时间点（Single time point），单击 OK 按钮，弹出图 17-37 所示的网格重分的时间，设置网格重分时间为 0.005，单击 OK 按钮。

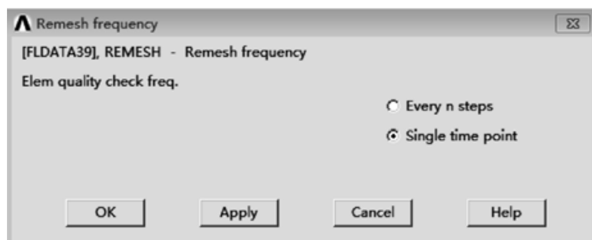


图 17-36　网格重分的频率设置面板

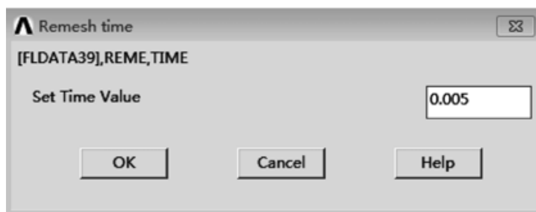


图 17-37　网格重分的时间设置面板

11．关闭并行运算功能

由于 VOF 求解不支持并行计算，因此需要使用下列命令流关闭并行运算功能：

```
PSCONTROL,ALL,OFF
```

12．求解

GUI：Main Menu | Solution | Run FLOTRAN，开始求解。

17.2.3 后处理

图 17-38～17-49 所示为机翼不同时刻的流速云图与压力云图，图 17-50 和图 17-51 所示为不同时刻的有限元模型。图 17-53～图 17-55 所示分别为图 17-52 中不同节点处的位移、速度和压力随时间的变化关系。具体查看方法，可以参见本章的视频教程。

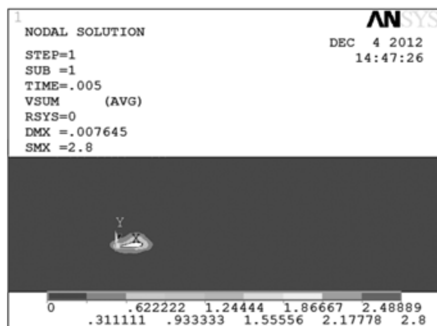


图 17-38 0.005s 时刻的流场流速云图

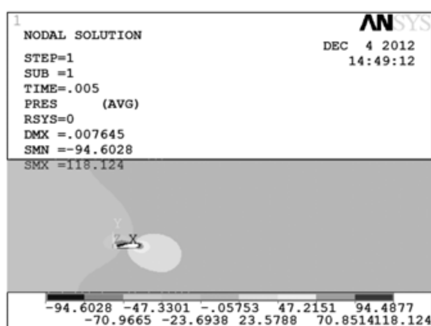


图 17-39 0.005s 时刻的流场压力云图

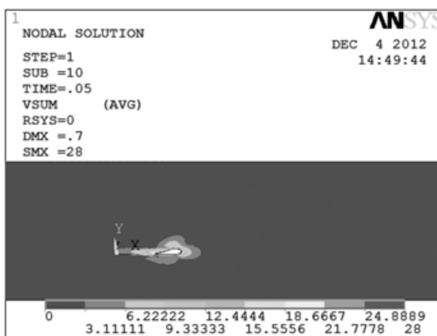


图 17-40 0.05s 时刻的流场流速云图

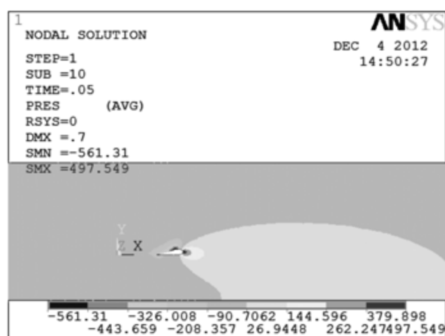


图 17-41 0.05s 时刻的流场压力云图

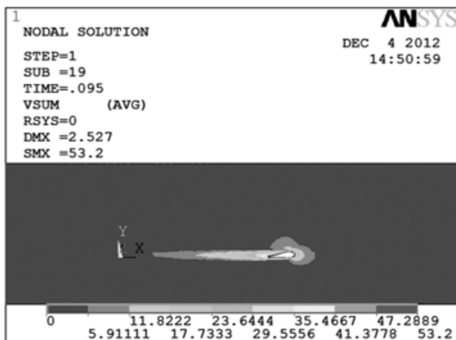


图 17-42 0.095s 时刻的流场流速云图

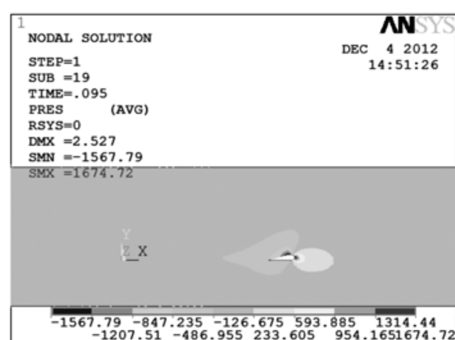


图 17-43 0.095s 时刻的流场压力云图

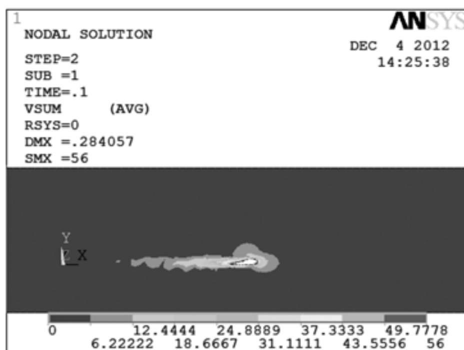


图 17-44 0.1s 时刻的流场流速云图

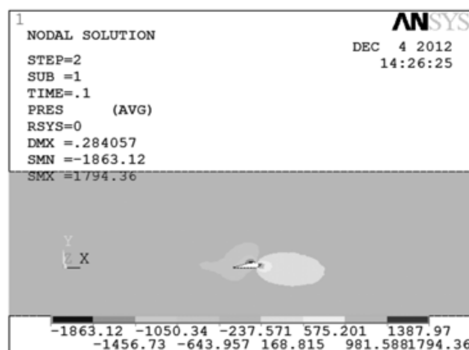


图 17-45 0.1s 时刻的流场压力云图



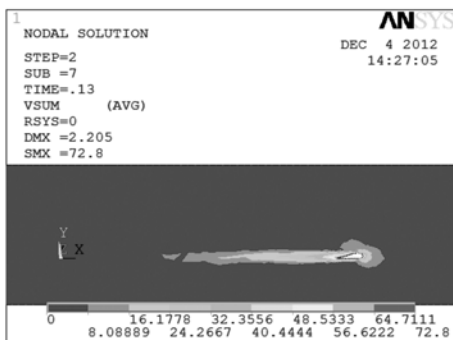


图 17-46　0.13s 时刻的流场流速云图

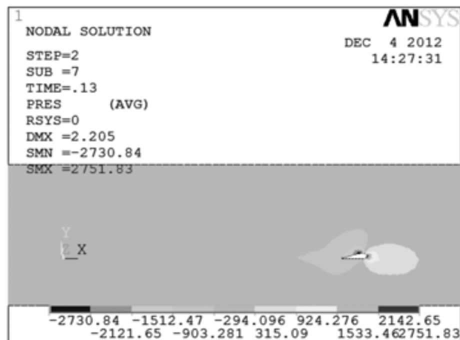


图 17-47　0.13s 时刻的流场压力云图

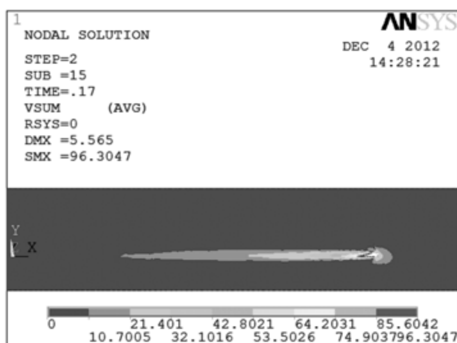


图 17-48　0.17s 时刻的流场流速云图

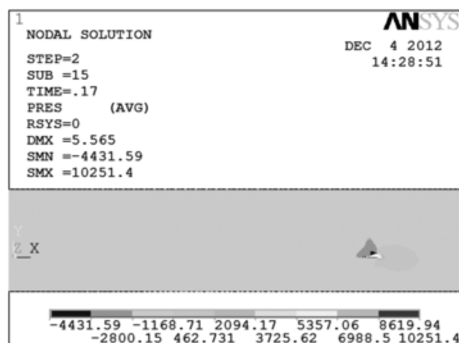


图 17-49　0.17s 时刻的流场压力云图

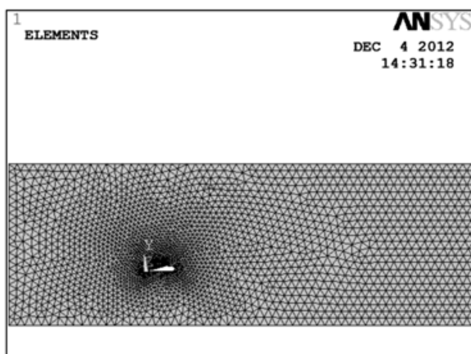


图 17-50　0.005s 时刻的网格

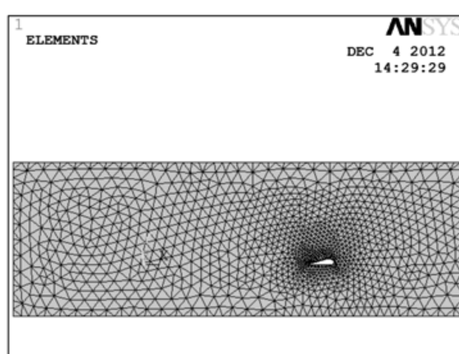


图 17-51　0.1s 时刻的网格

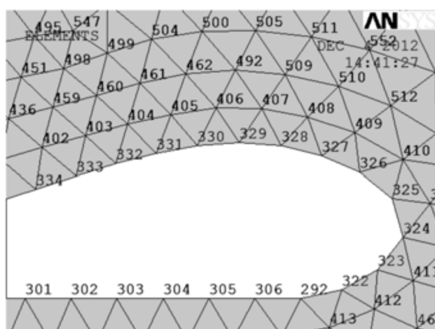


图 17-52　机翼附近节点编号示意图

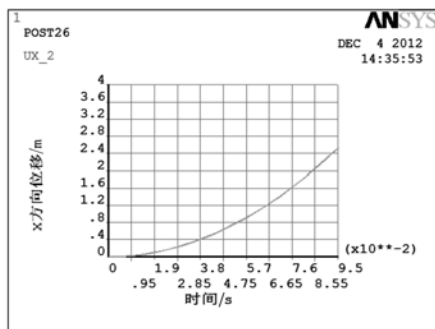


图 17-53　324 节点 *X* 方向位移与时间关系

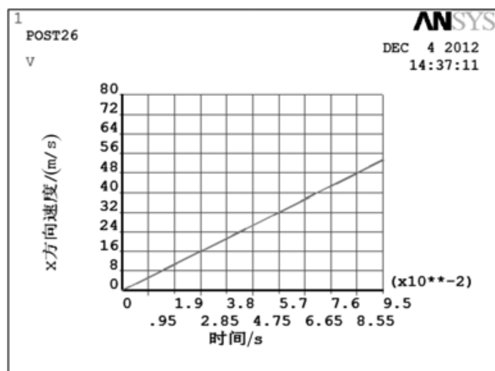


图 17-54　324 节点 *X* 方向速度与时间关系

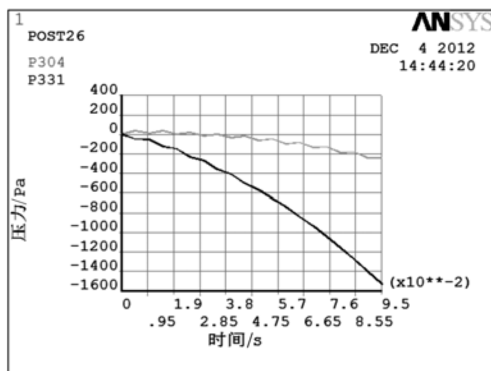


图 17-55　331 节点与 304 节点处压力与时间的关系

17.3　命令流

```
/FILNAME,Flow field analysis of aircraft,0
/PREP7
!定义流体单元
ET,1,141
!设置单元关键字
KEYOPT,1,4,1
!建立模型
K,1,0,0,0   !定义关键点
K,2,0.4,0,0
K,3,0.46,0.04,0
K,4,0.38,0.09,0
K,5,0.2,0.05,0
!定义直线
LSTR,        1,        2
LSTR,        5,        1
!建立机翼模型
FLST,3,4,3
FITEM,3,2
FITEM,3,3
FITEM,3,4
FITEM,3,5
BSPLIN, ,P51X, , , , ,-1,0,0,-1,-0.25,0,
FLST,2,3,4
FITEM,2,1
FITEM,2,2
FITEM,2,3

AL,P51X
RECTNG,-2,13,-0.8,1.6,
```

```
ASBA,2,1 !进行布尔减运算
!划分网格
LESIZE,1,,,15
LESIZE,2,,,15
LESIZE,3,,,15
ESIZE,0.12
mshape,1,2d !设置单元形状为三角形
AMESH,ALL
!进入求解
/SOL
!定义边界条件
DL,7, ,UY,0,1
DL,7, ,UX,0,1
DL,7, ,VX,0,0
DL,7, ,VY,0,0
DL,7, ,PRES,0,1
DL,5, ,UY,0,1
DL,5, ,UX,0 ,1
DL,5, ,PRES,0,1
!定义函数
*DEL,_FNCNAME
*DEL,_FNCMTID
*DEL,_FNCCSYS
*SET,_FNCNAME,'S'
*SET,_FNCCSYS,0
*DIM,%_FNCNAME%,TABLE,6,5,1,,,,%_FNCCSYS%
*SET,%_FNCNAME%(0,0,1), 0.0, −999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,1), 1.0, −1, 0, 2, 0, 0, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,2,1), 0.0, −2, 0, 1, 1, 17, −1
*SET,%_FNCNAME%(0,3,1),      0, −1, 0, 280, 0, 0, −2
*SET,%_FNCNAME%(0,4,1), 0.0, −3, 0, 1, −1, 3, −2
*SET,%_FNCNAME%(0,5,1), 0.0, 99, 0, 1, −3, 0, 0
!-->
*DEL,_FNCNAME
*DEL,_FNCMTID
*DEL,_FNCCSYS
*SET,_FNCNAME,'V'
*SET,_FNCCSYS,0
*DIM,%_FNCNAME%,TABLE,6,3,1,,,,%_FNCCSYS%
*SET,%_FNCNAME%(0,0,1), 0.0, −999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,1), 0.0
```



```
*SET,%_FNCNAME%(3,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,1), 1.0, −1, 0, 560, 0, 0, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,2,1), 0.0, −2, 0, 1, −1, 3, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,3,1),      0, 99, 0, 1, −2, 0, 0
! End of equation: 560*{TIME}
!定义动壁面的位移边界条件
DL,2, ,UY,0,1
DL,2, ,UX,%S% ,1
DL,3, ,UY,0,1
DL,3, ,UX,%S% ,1
DL,1, ,UY,0,1
DL,1, ,UX,%S% ,1
!定义动壁面上的无滑移边界条件
DL,1, ,VX,%V%,0
DL,1, ,VY,0,0
DL,2, ,VX,%V%,0
DL,2, ,VY,0,0
DL,3, ,VX,%V%,0
DL,3, ,VY,0,0
DL,4, ,VX,0,0
DL,4, ,VY,0,0
DL,4, ,UY,0,1
DL,4, ,UX,0,1
DL,6, ,UY,0,1
DL,6, ,UX,0,1
DL,6, ,VY,0,0
!设置流体求解选项
FLDATA1,SOLU,TRAN,1
FLDATA1,SOLU,FLOW,1
FLDATA1,SOLU,TURB,1
FLDATA1,SOLU,ALE,1
!设置求解控制
FLDATA4,TIME,STEP,0.005,
FLDATA4,TIME,NUMB,34
FLDATA4,TIME,TEND,0.17,
FLDATA4,TIME,APPE,0.005,
!设置计算结果输出
FLDATA5,OUTP,PTOT,1
FLDATA5,OUTP,TTOT,1
FLDATA5,OUTP,HFLU,1
FLDATA5,OUTP,HFLM,1
FLDATA5,OUTP,STRM,1
FLDATA5,OUTP,PCOE,1
```

```
FLDATA5,OUTP,MACH,1
FLDATA5,OUTP,YPLU,1
FLDATA5,OUTP,TAUW,1
FLDATA5,OUTP,RDFL,1
!设置流体属性参数
FLDATA7,PROT,DENS,CONSTANT
FLDATA8,NOMI,DENS,1.0
FLDATA7,PROT,VISC,CONSTANT
FLDATA8,NOMI,VISC,0.00002
!考虑流体重力
ACEL,0,9.81,0,
!设置流体求解稳定参数
FLDATA26,STAB,VISC,0.25,
!设置压力方程求解器
FLDATA18,METH,PRES,1
FLDATA19,TDMA,PRES,200,
!设置流体瞬态求解算法
FLDATA,OUTP,TAUW,T
FLDATA,TIME,METH,NEWM
FLDATA,TIME,DELT,0.5
!设置网格重分
FLDATA,REMESH,ELEM,ALL！ 设置重分单元的范围
!设置重分单元尺寸
FLDATA39,REME,REXP,1.4,
!设置重分单元的质量
FLDATA,REMESH,ARMA,40.0
FLDATA,REMESH,VOCH,8.0
FLDATA,REMESH,ARCH,40.0
!设置重分单元的频率
FLDATA39,REME,TIME,0.005,
!开始求解
SOLVE
```

第 18 章　联合使用 ALE 和 VOF 模拟动壁



18.1　问题的描述

18.1.1 几何模型

图 18−1 所示为动壁分析模型的简图，其中左侧为移动壁面，底面和右侧面为固定壁面，几何尺寸如图 18−1 所示。

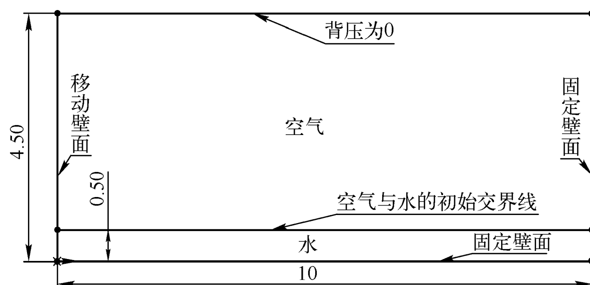


图 18−1　动壁分析模型简图

18.1.2 流体属性参数

该实例的流体为液体，因为不考虑温度，因此只需要给出流体的密度和粘度。设置流体的密度为 1000kg/m^3，0.00015kg/(m/s)。

18.1.3 选择单元

本实例选用二维流体单元 FLUID141 单元。

18.1.4 流体流动模型

该实例假设流体的流动状态为湍流，并且使用 RNG 湍流模型。

18.1.5 边界条件及载荷

假设移动壁面的运动规律符合式（18−1）和式（18−2），固定壁面为无滑移边界条件，模

型的顶面的压力为 0，图 18−2 和图 18−3 所示分别为移动壁面的位移、速度与时间的关系。

$$UX = \begin{cases} t^3 & 0 \leqslant t \leqslant 2 \\ 8 & t > 2 \end{cases} \tag{18-1}$$

$$VX = \begin{cases} 3t^2 & 0 \leqslant t \leqslant 2 \\ 0 & t > 2 \end{cases} \tag{18-2}$$

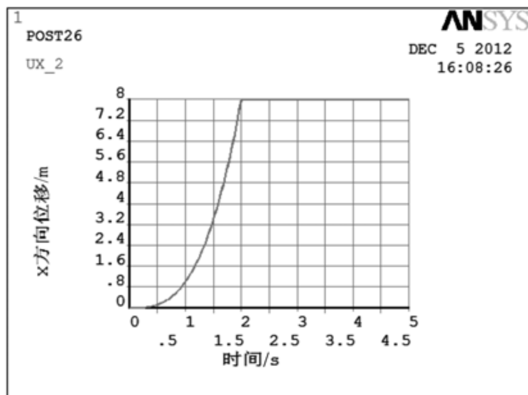


图 18−2 动壁的 X 方向位移与时间的关系

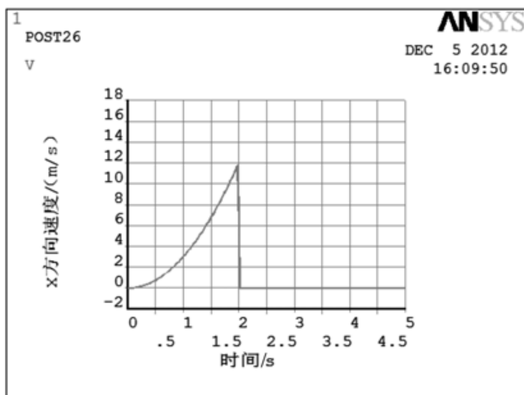


图 18−3 动壁的 X 方向速度与时间的关系

18.2 GUI 操作

18.2.1 前处理

1．定义文件名

GUI：Utility Menu | File | Change Jobname，弹出一个对话框，在文本框中输入“ALE AND VOF JOINT ANALYSIS”，单击 OK 按钮。

2．选择单元

（1）定义单元

GUI：Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击 Add，弹出图 18−4 所示的选择单元对话框，选择左侧中的 FLOTRAN CFD 项，然后在右边选择 2D FLOTRAN 141 项，单击 OK 按钮。

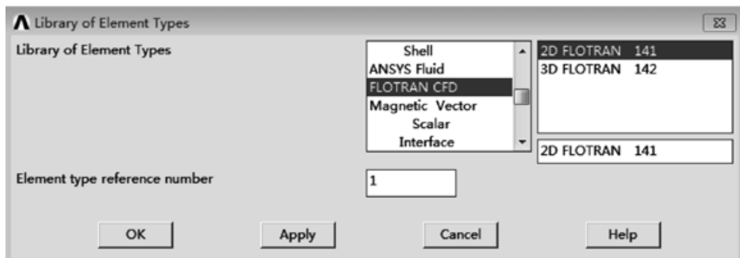


图 18−4 选择单元对话框

（2）设置单元关键字

在单元类型对话框中选择 FLUID141。然后单击 Options 选项，弹出图 18-5 所示的 FULID141 单元关键字设置面板，将支持网格位移自由度选项（Support mesh disp. DOFS）设置为 Yes，单击 OK 按钮，返回单元类型界面，单击 Close 按钮。

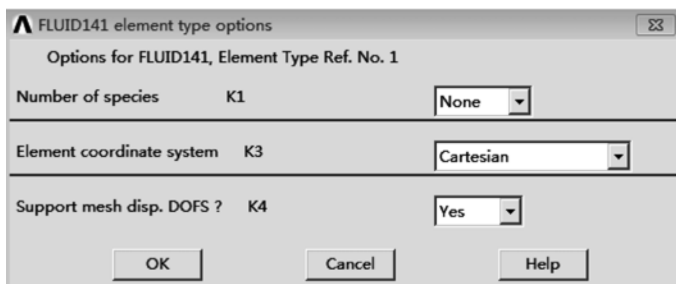


图 18-5 FULID141 单元关键字设置面板

3．建立模型

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By Dimensions，弹出图 18-6 所示的通过尺寸创建矩形设置面板，设置 X1=0、X2=10、Y1=0、Y2=4.5，单击 OK 按钮。

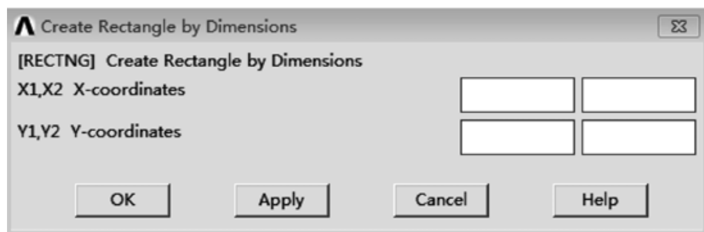


图 18-6 通过尺寸创建矩形设置面板

4．划分网格

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool

（2）设置总体网格尺寸

选择图 18-7 所示的网格划分工具面板中尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设置（Set）按钮，弹出图 18-8 所示的总体网格尺寸设置面板。

该设置面板中存在两个控制选项，即单元尺寸控制（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸文本框中输入“0.01”，单击 OK 按钮。

（3）划分网格

单击网格划分工具面板上的网格划分（Mesh）按钮，弹出拾取对话框，拾取矩形，单击 OK 按钮。

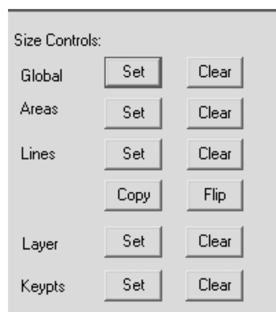


图 18-7 网格划分工具面板中尺寸控制子面板

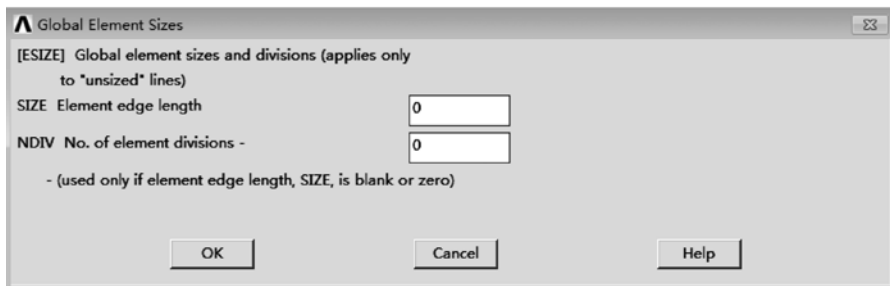


图 18-8　总体网格尺寸设置面板

18.2.2 求解

1．定义流体边界条件

（1）定义动壁位移边界条件

1）定义函数。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Functions | Define/Edit，弹出图 18-9 所示的函数编辑器面板，选择函数类型为基于区域变量的分段函数（Multivalued function based on regime variable），并设置分段函数的变量名为 T，且 T 等于 TIME 变量，然后单击区域 1（Regime1）选项卡，弹出图 18-10 所示的区域 1 函数表达式设置面板，设置变量 T 的取值区间为 0～2，对应的函数表达式为{TIME}^3。继续单击区域 2（Regime2）选项卡，弹出图 18-11 所示的区域 2 函数表达式设置面板，输入变量 T 的取值区间为 2～10，对应的函数表达式为 8。

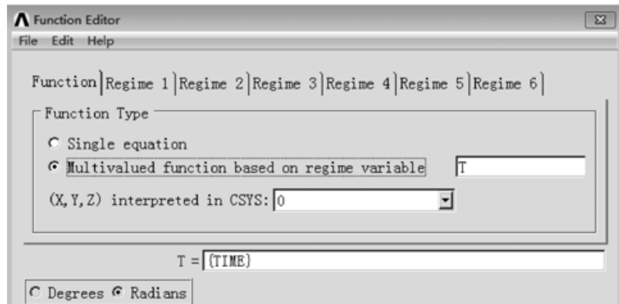


图 18-9　函数编辑器面板

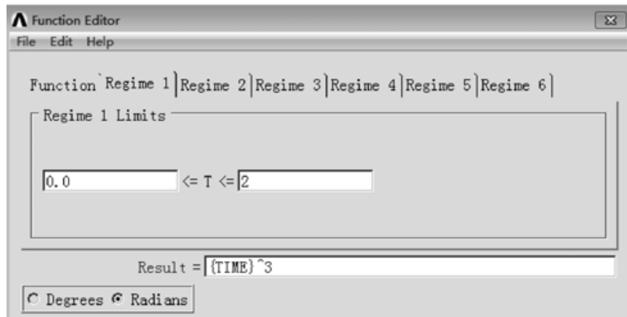


图 18-10　区域 1 函数表达式设置面板

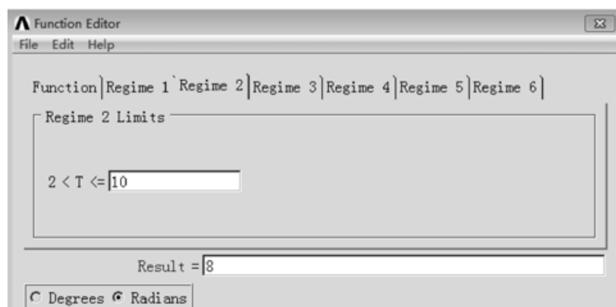


图 18-11 区域 2 函数表达式设置面板

2）保存函数。

选择函数编辑器面板上的菜单命令 File｜Save，弹出保存文件的面板，设置保存的文件名为 U，单击保存按钮。

3）读入函数。

GUI：Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Functions｜Read File，弹出打开文件界面，选择刚保存的文件 U.func，进行打开操作，弹出图 18-12 所示的函数加载器设置面板，设置表格参数名（Table parameter name）为 U，单击 OK 按钮。

4）定义动壁位移约束。

GUI：Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Fluid/CFD｜Displacement｜On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L4，单击 OK 按钮，弹出图 18-13 所示的在线处施加位移约束设置面板，选择 UX 的载荷形式为存在的表格（Existing table），设置 UY=0，单击 OK 按钮，选择存在的表格为 U，单击 OK 按钮。

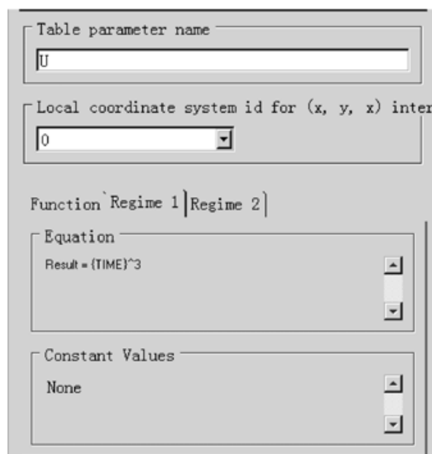


图 18-12 函数加载器设置面板

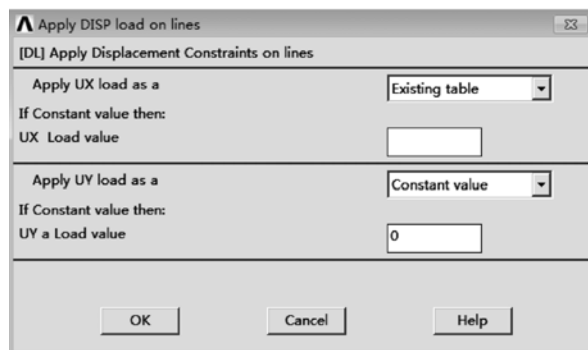


图 18-13 在线处施加位移约束设置面板

（2）定义动壁速度边界条件

1）定义函数。

GUI：Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Functions｜Define/Edit，弹出图 18-14 所示的函数编辑器面板，选择函数类型为基于区域变量的分段函数（Multivalued

function based on regime variable），并设置分段函数的变量名为 T，且 T 等于 TIME 变量，然后单击区域 1（Regime1）选项卡，弹出图 18-15 所示的区域 1 函数表达式设置面板，设置变量 T 的取值区间为 0～2，对应的函数表达式为 3*{TIME}^2。继续单击区域 2（Regime2）选项卡，弹出图 18-16 所示的区域 2 函数表达式设置面板，输入变量 T 的取值区间为 2～10，对应的函数表达式为 0。

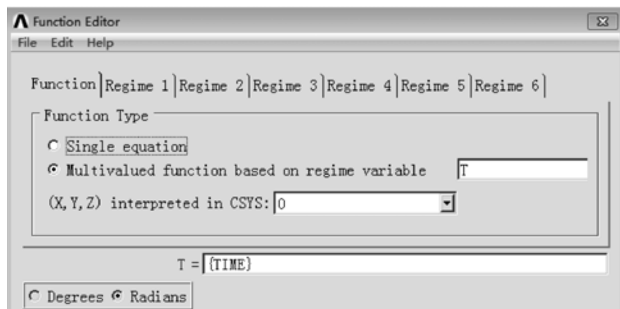


图 18-14 函数编辑器面板

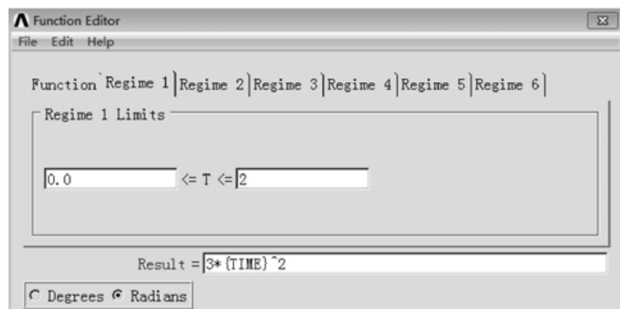


图 18-15 区域 1 函数表达式设置面板

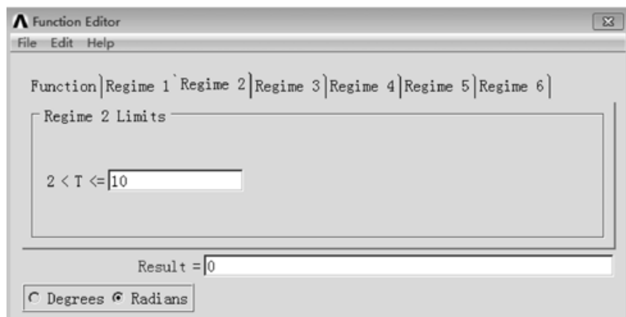


图 18-16 区域 1 函数表达式设置面板

2）保存函数。

选择函数编辑器面板上的菜单命令 File | Save，弹出保存文件的面板，输入保存的文件名为 V，单击“保存”按钮。

3）读入函数。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Functions | Read File，弹出打开文

件界面，选择刚保存的文件 V.func，进行打开操作，弹出图 18-17 所示的函数加载器设置面板，设置表格参数名（Table parameter name）为 V，单击 OK 按钮。

4）定义动壁的速度约束。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L4，单击 OK 按钮，弹出图 18-18 所示的在线处施加速度设置面板，选择 VX 的载荷形式为存在的表格（Existing table），设置 VY=0，单击 OK 按钮，选择存在的表格为 V，单击 OK 按钮。

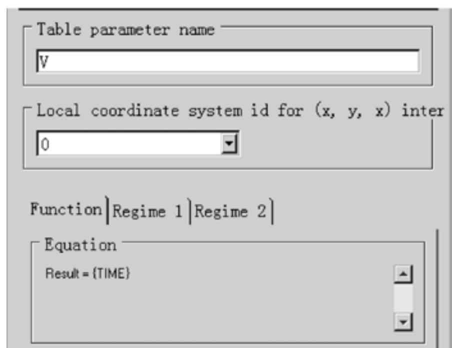


图 18-17 函数加载器设置面板

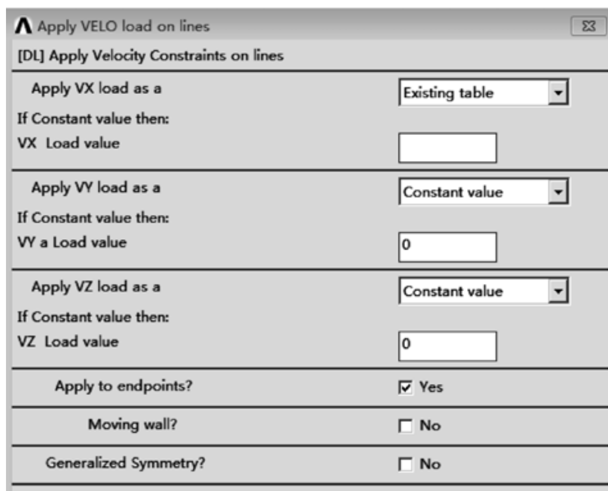


图 18-18 在线处施加速度设置面板

（3）定义底面的边界条件

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L1，单击 OK 按钮，弹出图 18-18 所示的在线处施加速度设置面板，设置 VX=0 和 VY=0，单击 OK 按钮，选择存在的表格为 V，单击 OK 按钮。

（4）定义右侧面的边界条件

1）定义无滑移边界条件。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L2，单击 OK 按钮，弹出图 18-18 所示的在线处施加速度设置面板，设置 VX=0 和 VY=0，单击 OK 按钮，选择存在的表格为 V，单击 OK 按钮。

2）定义固定约束。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Displacement | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L2，单击 OK 按钮，弹出图 18-18 所示的在线处施加位移约束设置面板，设置 UX=0 和 UY=0，单击 OK 按钮。

（5）定义顶面的边界条件

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Pressure DOF | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L3，单击 OK 按钮，弹出图 18-19 所示的在线处施加压力设置面板，设置压力为 0，单击 OK 按钮。

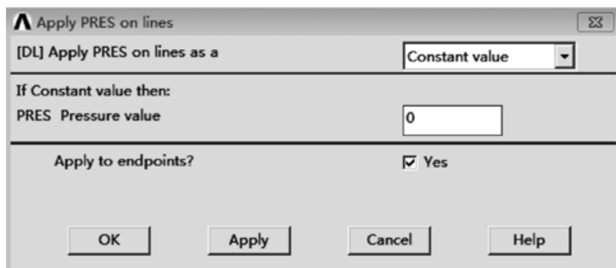


图 18-19　在线处施加压力设置面板

（6）定义初始的 VFRC 值

1）选择节点。

GUI：Utility Menu | Select | Entities，弹出图 18-20 所示的选择节点设置面板，设置选择方法为通过位置（By Location），输入 *Y* 坐标的取值范围从 0～0.5，单击 Apply 按钮，继续按照图 18-21 所示的选择单元设置面板进行设置，单击 OK 按钮。

2）定义单元的初始 VOF 值。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Volume Fract | Init Loads | On Element，弹出拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出图 18-22 所示的定义单元的初始 VFRC 值设置面板，设置 VFRC 值为 1，单击 OK 按钮。



图 18-20　选择节点设置面板

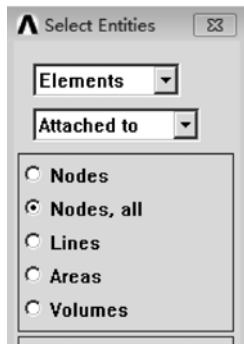


图 18-21　选择单元设置面板

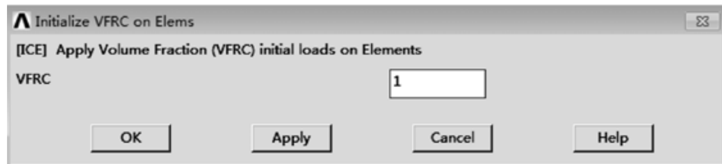


图 18-22　定义单元的初始 VFRC 值设置面板

2．设置流体求解选项

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Solution Options，弹出图 18-23 所示的流体求解选项设置面板，设置 TRAN 选项为 Transient，即求解瞬态流体流动问题；设置 TURB 选项为 Turbulent，即流体流动状态为湍流，激活允许网格移动选项（Allow mesh motion），其他选项保持默认值，单击 OK 按钮。

3．设置求解控制

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Execution Ctrl，弹出图 18-24 所示的时间步控制设置面板，设置时间步控制方式为用户定义（User defined），设置输出控制方式为时间步（Time Steps），单击 OK 按钮。

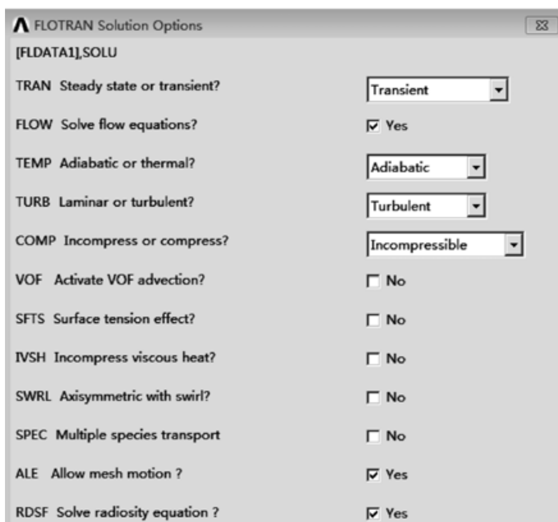


图 18-23　流体求解选项设置面板

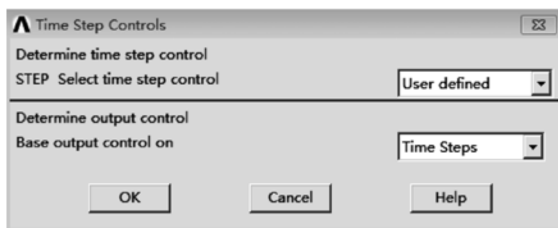


图 18-24　时间步控制设置面板

弹出图 18-25～图 18-27 所示的瞬态求解中的求解时间、迭代和结果输出设置面板，设置用户定义时间步（User-defined time step）为 0.01，时间步数（Number of time steps）为 500，求解终止时间（Stop time）为 5s，设置每个时间点的总体迭代次数（Global iter per time step）为 15，设置计算结果每隔 0.02s 输出一次（Append frequency to results file），单击 OK 按钮。



图 18-25　瞬态控制中求解时间设置面板

Time Step Termination
GLOB Global iter per time step 15
VX Velocity component 0.01
VY Velocity component 0.01
VZ Velocity component 0.01
PRES Pressure 1e-006
TEMP Temperature 1e-006
ENKE Turbulent kinetic energy 0.01
ENDS Turbulent dissipation 0.01
Note: Termination check is ignored for a DOF
if its termination criterion is negative

图 18-26　瞬态控制中迭代设置面板

Overwrite frequency to results file
STEP,OVER Number of time steps 0
Append frequency to results file
STEP,APPE Number of time steps 0.02
Summary frequency to output file
STEP,SUMF Number of time steps 10
[FLDATA4]-Transient Boundary Condition Application
TIME,BC Apply Varying B.C. as
Step Change
Linear Ramp
TEND End Time for Ramp BC 5
Note: End Time will also end the analysis.

图 18-27　瞬态控制中结果输出设置面板

4．设置计算结果输出

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Additional Out | RFL Out Derived，弹出图 18-28 所示的导出量输出控制面板，勾选面板上的所有选项，单击 OK 按钮。

RFL Output Derived
[FLDATA5],OUTP Output options for FLOTRAN results file
for calculated output quantities
PTOT Output total pressure? Yes
TTOT Output total temperature? Yes
HFLU Output heat flux? Yes
HFLM Output film coefficients? Yes
STRM Output stream function? Yes
PCOE Output pressure coeff? Yes
MACH Output Mach number? Yes
YPLU Output y plus? Yes
TAUW Output wall shear stress? Yes
RDFL Output radiation flux? Yes
OK　Cancel　Help

图 18-28　导出量输出控制面板

5．设置流体属性参数

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Fluid Properties，弹出图 18-29 所示的流体属性参数设置面板，设置密度选项为常数（Constant），设置粘度选项为常数（Constant），单击 OK 按钮，弹出图 18-30 所示的计算流体属性设置面板，设置流体密度为 1000，粘度为 0.00002，单击 OK 按钮。

6．设置流体环境

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Flow Enviroement | Gravity，弹出图 18-31 所示的流体重力设置面板，因为考虑流体竖直向下的重力，因此设置 *Y* 方向加速度为 9.8，单击 OK 按钮。

7．设置流体求解稳定参数

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Relax/Stab/Cap | Stability Parms，弹出图 18-32 所示的流体求解稳定参数设置面板，设置人工阻尼（Artificial viscosity）为 0.2，单击 OK 按钮。

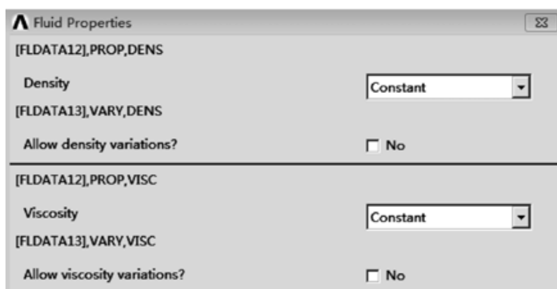


图 18-29　流体属性参数设置面板

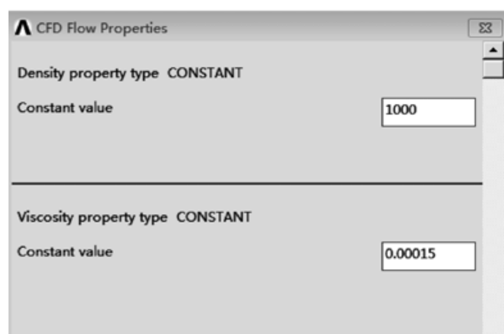


图 18-30　计算流体属性设置面板

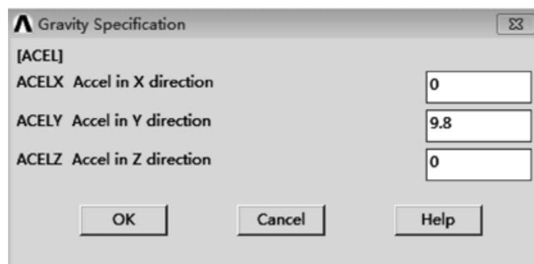


图 18-31　流体重力设置面板

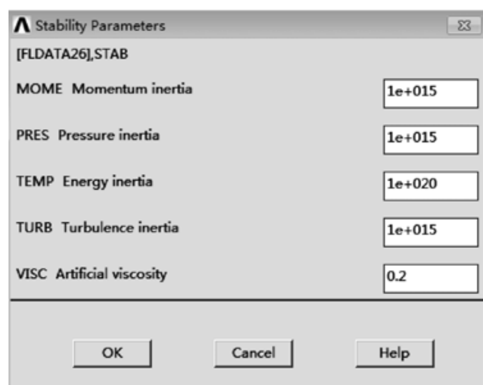


图 18-32　流体求解稳定参数设置面板

8．设置压力方程求解器

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | CFD Solver Controls | PRES Solver CFD，弹出图 18-33 所示的压力方程求解器设置面板，选择求解方法为 TDMA，单击 OK 按钮，弹出图 18-34 所示的 TDMA 方法迭代次数设置面板，设置迭代次数为 200，单击 OK 按钮。

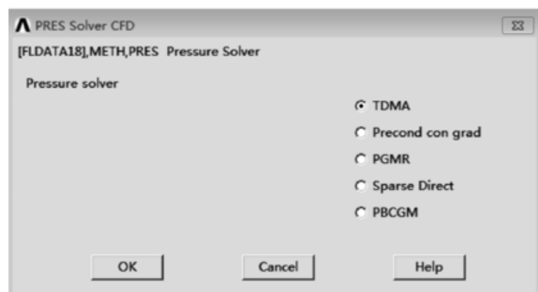


图 18-33　压力方程求解器设置面板

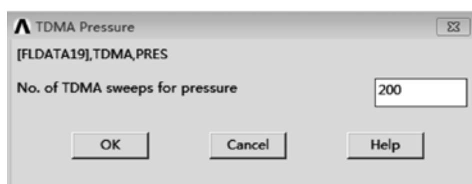


图 18-34　TDMA 方法迭代次数设置面板

9．关闭并行运算功能

由于 VOF 求解不支持并行计算，因此需要使用下列命令流关闭并行运算功能：

```
PSCONTROL,ALL,OFF
```

10．求解

GUI：Main Menu｜Solution｜Run FLOTRAN，开始求解。

18.2.3 后处理

图 18-35～图 18-52 所示为流体不同时刻的体积分数和流体速度云图，具体查看方法，用户可以参见本章的视频教程。

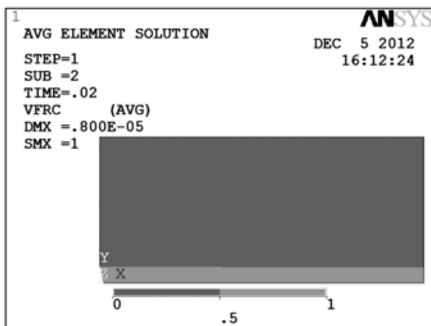


图 18-35　0.02s 时刻的流体体积分数云图

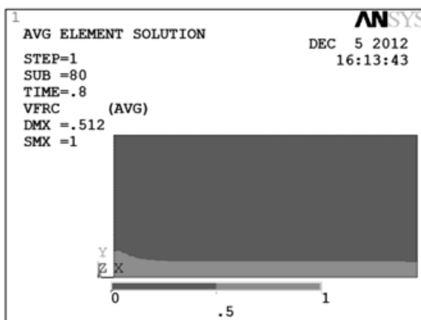


图 18-36　0.8s 时刻的流体体积分数云图

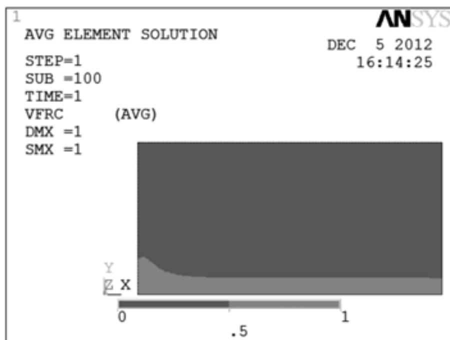


图 18-37　1s 时刻的流体体积分数云图

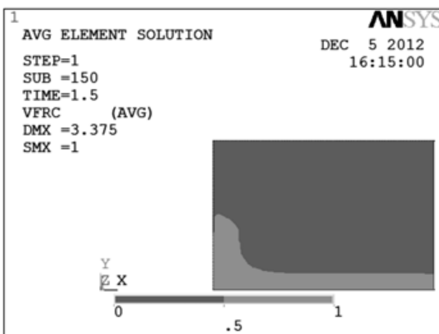


图 18-38　1.5s 时刻的流体体积分数云图

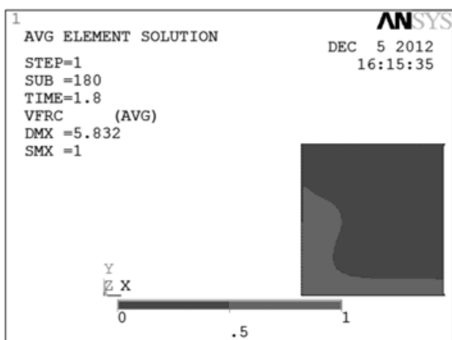


图 18-39　1.8s 时刻的流体体积分数云图

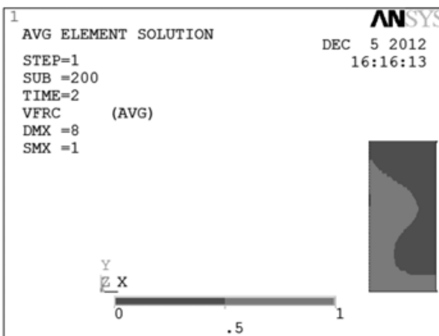


图 18-40　2s 时刻的流体体积分数云图

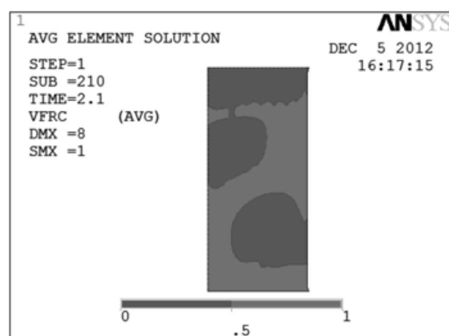


图 18-41　2.1s 时刻的流体体积分数云图

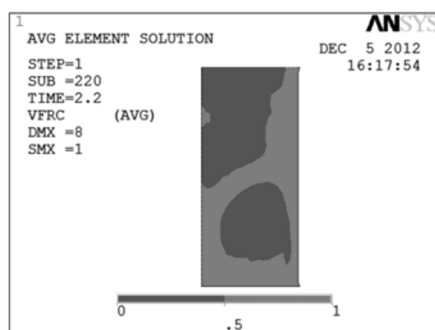


图 18-42　2.2s 时刻的流体体积分数云图

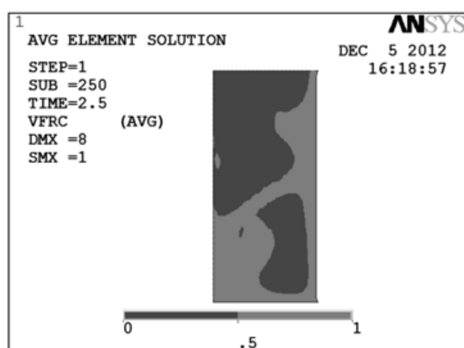


图 18-43　2.5s 时刻的流体体积分数云图

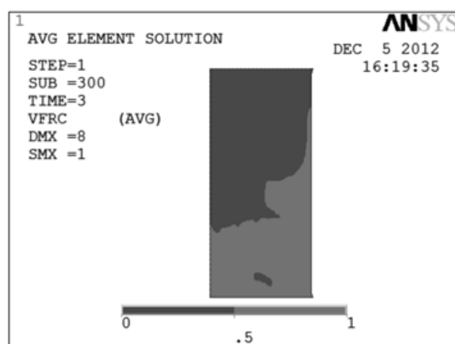


图 18-44　3s 时刻的流体体积分数云图

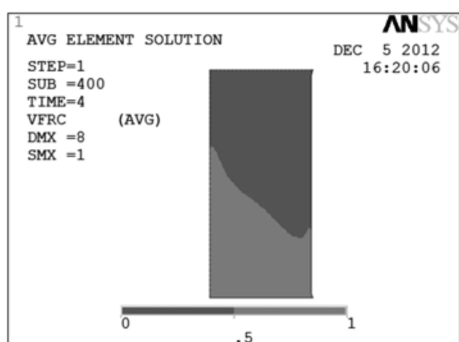


图 18-45　4s 时刻的流体体积分数云图

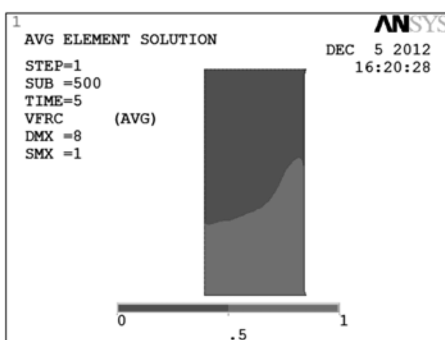


图 18-46　5s 时刻的流体体积分数云图

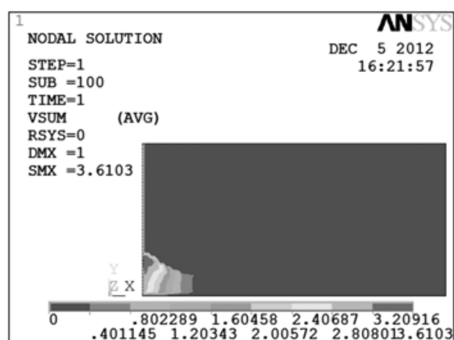


图 18-47　1s 时刻的流体速度云图

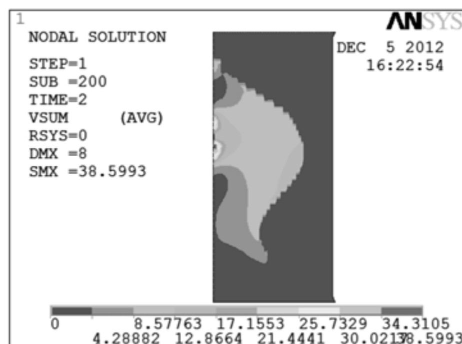


图 18-48　2s 时刻的流体速度云图

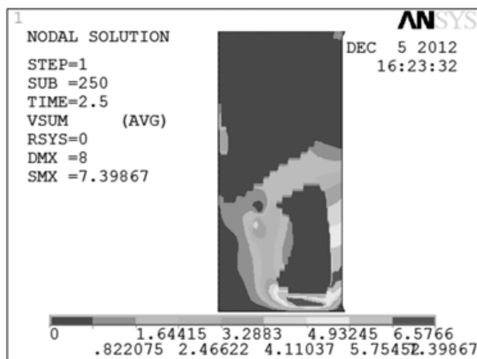


图 18-49　2.5s 时刻的流体速度云图

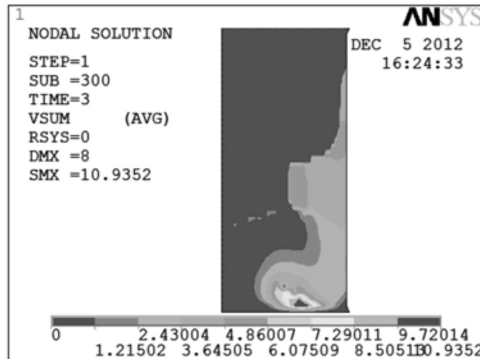


图 18-50　3s 时刻的流体速度云图

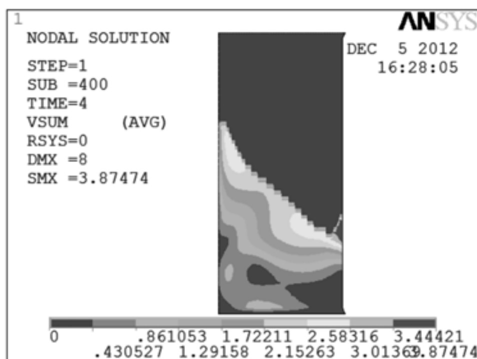


图 18-51　4s 时刻的流体速度云图

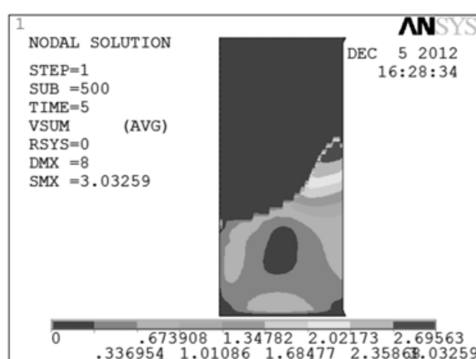


图 18-52　5s 时刻的流体速度云图

18.3　命令流

```
/FILNAME,ALE and VOF joint analysis1 ,0
/PREP7
!定义流体单元
ET,1,141
!设置流体单元关键字
keyopt,1,4,1
!建立模型
rect,0,10,0,4.5
!划分网格
ESIZE,0.1
AMESH,ALL
!进入求解
/SOL
!定义函数
*DEL,_FNCNAME
*DEL,_FNCMTID
*DEL,_FNCCSYS
```



```
*SET,_FNCNAME,'U'
*SET,_FNCCSYS,0
! /INPUT,U.func,,,1
*DIM,%_FNCNAME%,TABLE,6,3,3,,,,%_FNCCSYS%
!
! Begin of equation: {TIME}
*SET,%_FNCNAME%(0,0,1), 0.0, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,1), 1.0, 99, 0, 1, 1, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,2,1),     0
*SET,%_FNCNAME%(0,3,1),     0
! End of equation: {TIME}
!
! Begin of equation: {TIME}^3
*SET,%_FNCNAME%(0,0,2), 2, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,2), 1.0, -1, 0, 3, 0, 0, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,2,2), 0.0, -2, 0, 1, 1, 17, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,3,2),     0, 99, 0, 1, -2, 0, 0
! End of equation: {TIME}^3
!
! Begin of equation: 8
*SET,%_FNCNAME%(0,0,3), 10, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,3), 1.0, 99, 0, 8, 0, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,2,3),     0
*SET,%_FNCNAME%(0,3,3),     0
! End of equation: 8
!-->
*DEL,_FNCNAME
*DEL,_FNCMTID
*DEL,_FNCCSYS
*SET,_FNCNAME,'V'
*SET,_FNCCSYS,0
```

```
! /INPUT,V.func,,,1
*DIM,%_FNCNAME%,TABLE,6,5,3,,,,%_FNCCSYS%
!
! Begin of equation: {TIME}
*SET,%_FNCNAME%(0,0,1), 0.0, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,1), 1.0, 99, 0, 1, 1, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,2,1),     0
*SET,%_FNCNAME%(0,3,1),     0
*SET,%_FNCNAME%(0,4,1),     0
*SET,%_FNCNAME%(0,5,1),     0
! End of equation: {TIME}
!
! Begin of equation: 3*{TIME}^2
*SET,%_FNCNAME%(0,0,2), 2, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,2), 1.0, -1, 0, 2, 0, 0, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,2,2), 0.0, -2, 0, 1, 1, 17, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,3,2),     0, -1, 0, 3, 0, 0, -2
*SET,%_FNCNAME%(0,4,2), 0.0, -3, 0, 1, -1, 3, -2
*SET,%_FNCNAME%(0,5,2), 0.0, 99, 0, 1, -3, 0, 0
! End of equation: 3*{TIME}^2
!
! Begin of equation: 0
*SET,%_FNCNAME%(0,0,3), 10, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,3), 1.0, 99, 0, 0, 0, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,2,3),     0
*SET,%_FNCNAME%(0,3,3),     0
*SET,%_FNCNAME%(0,4,3),     0
*SET,%_FNCNAME%(0,5,3),     0
! End of equation: 0
!定义边界条件
DL,4, ,VX, %V% ,1
```

```
DL,4, ,VY,
DL,4, ,UX, %U% ,1
DL,4, ,UY,0
DL,1, ,VX,0,1
DL,1, ,VY,0,1
DL,2, ,UX,0
DL,2, ,UY,0
DL,2, ,VX,0,1
DL,2, ,VY,0,1
DL,3, ,PRES,0,1
!设置 VOF 初始载荷
nsel,s,loc,y,0,0.5
esln,s,1
ice,all,vfrc,1.0
allsel
!设置流体求解选项
FLDATA1,SOLU,TRAN,1
FLDATA1,SOLU,FLOW,1
FLDATA1,SOLU,TURB,1
FLDATA1,SOLU,VOF,1
FLDATA1,SOLU,ALE,1
FLDATA1,SOLU,RDSF,1
!设置求解控制
FLDATA4,TIME,STEP,0.01,
FLDATA4,TIME,NUMB,500
FLDATA4,TIME,TEND,5,
FLDATA4,TIME,GLOB,15,
FLDATA4,TIME,APPE,0.02,
!设置计算结果输出
FLDATA5,OUTP,PTOT,1
FLDATA5,OUTP,TTOT,1
FLDATA5,OUTP,HFLU,1
FLDATA5,OUTP,HFLM,1
FLDATA5,OUTP,STRM,1
FLDATA5,OUTP,PCOE,1
FLDATA5,OUTP,MACH,1
FLDATA5,OUTP,YPLU,1
FLDATA5,OUTP,TAUW,1
FLDATA5,OUTP,RDFL,1
!设置流体属性参数
FLDATA12,PROP,DENS,0
FLDATA13,VARY,DENS,0
FLDATA12,PROP,VISC,0
FLDATA13,VARY,VISC,0
FLDATA12,PROP,COND,0
FLDATA13,VARY,COND,0
```



```
FLDATA12,PROP,SPHT,0
FLDATA13,VARY,SPHT,0
!*
FLDATA8,NOMI,DENS,1000,
FLDATA8,NOMI,VISC,0.00015,
!考虑流体重力
ACEL,0,9.81,0,
!设置流体求解稳定参数
FLDATA26,STAB,VISC,0.2,
!设置压力方程求解器
FLDATA18,METH,PRES,1
FLDATA19,TDMA,PRES,200,
!关闭并行运算功能
PSCONTROL,all,OFF
!开始求解
SOLVE
```



第 19 章　汽车的空气动力学分析

19.1　问题的描述

19.1.1 几何模型

图 19-1 所示为汽车空气动力学分析模型，该模型为对称的三维模型。

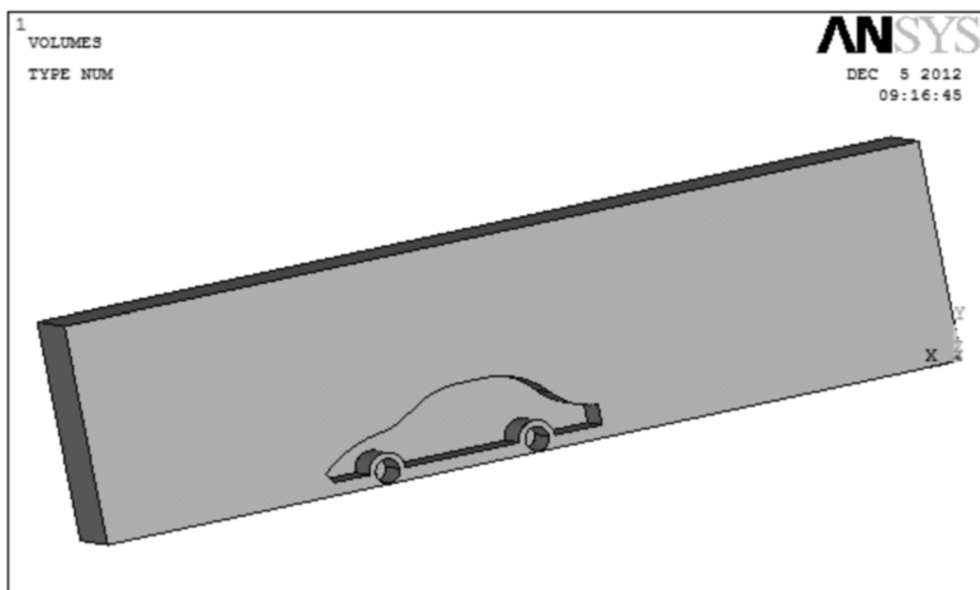


图 19-1　汽车空气动力学分析模型

19.1.2 流体属性参数

该实例的流体为空气，因为不考虑温度，因此只需要给出流体的密度和粘度。设置流体的密度为 AIR，粘度为 AIR。

19.1.3 选择单元

本实例选用三维流体单元 FLUID142 单元。

19.1.4 流体流动模型

该实例假设流体的流动状态为湍流，并且使用 RNG 湍流模型。

19.1.5 边界条件及载荷

假设入口的流动速度为 30m/s，出口的压力为 0，汽车表面：固定壁面，即将 3 个方向的流体流动速度设置为 0；地面：固定壁面，即将 3 个方向的流体流动速度设置为 0；流场侧面、顶面：固定壁面，即将 3 个方向的流体流动速度设置为 0，在对称面上施加对称条件。

19.2 GUI 操作

1．定义文件名

GUI：Utility Menu｜File｜Change Jobname，弹出一个对话框，在文本框中输入“Automotive aerodynamics”，单击 OK 按钮。

2．导入模型

GUI：Utility Menu｜File｜Import｜IGES，弹出图 19−2 所示的导入 IGES 文件设置面板，选择所有选项，单击 OK 按钮，弹出图 19−3 所示的导入 IGES 文件设置面板，单击 Browes 按钮，选择 ANSYS 工作文件夹中的 CAR.iges 文件，单击 OK 按钮。

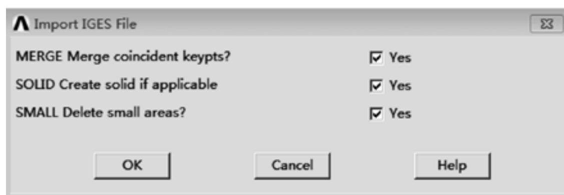


图 19−2　导入 IGES 文件设置面板

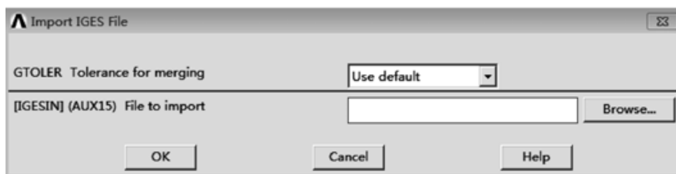


图 19−3　导入 IGES 文件设置面板

3．定义单元

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Element Type｜Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击 Add 按钮，弹出图 19−4 所示的选择单元对话框，选择左侧中的 FLOTRAN CFD 项，然后在右边选择 3D FLOTRAN 142 项，单击 OK 按钮。

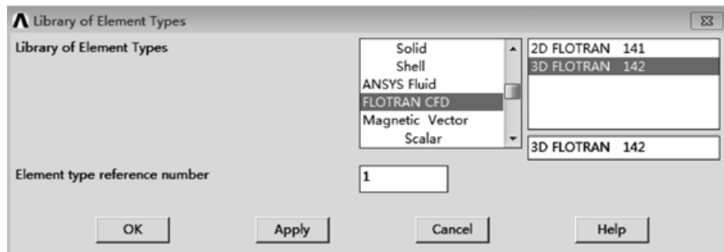


图 19−4　选择单元对话框

4．网格划分

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool

（2）设置总体网格尺寸

选择图 19-5 所示的网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设置（Set）按钮，弹出图 19-6 所示的总体网格尺寸设置面板。

该设置面板中存在两个控制选项，即单元尺寸控制（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸文本框中输入“0.09”，单击 OK 按钮。

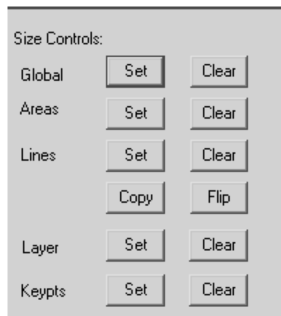


图 19-5 网格划分工具面板中尺寸控制子面板

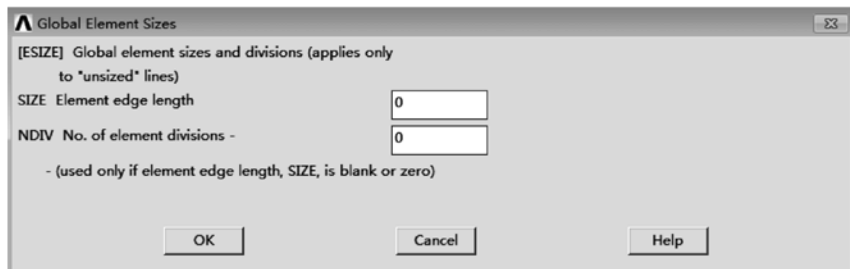


图 19-6 总体网格尺寸设置面板

（3）设置智能网格划分等级为 4

勾选网格划分工具面板上的智能网格尺寸选项（Smart Control）并拖到下面的进度条为 4。

（4）划分网格

选择网格划分工具面板上的网格划分（Mesh）按钮，弹出拾取对话框，单击 Pick All 按钮。

19.2.1 求解

1．定义流体边界条件

（1）定义入口边界条件

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Areas，弹出拾取对话框，拾取面 A31，单击 OK 按钮，弹出图 19-7 所示的在面处施加速度设置面板，设置 VX=-30、VY=0 和 VZ=0，单击 OK 按钮。

（2）定义出口边界条件

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Pressure DOF | On Areas，弹出拾取对话框，拾取面 A30，单击 OK 按钮，弹出图 19-8 所示的在面处施加压力设置面板，设置压力为 0，单击 OK 按钮。

（3）定义地面边界条件

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Areas，弹出拾取对话框，拾取面 A30，单击 OK 按钮，弹出图 19-7 所示的在面处施加速度设置面板，设置 VX=0、VY=0 和 VZ=0，单击 OK 按钮。



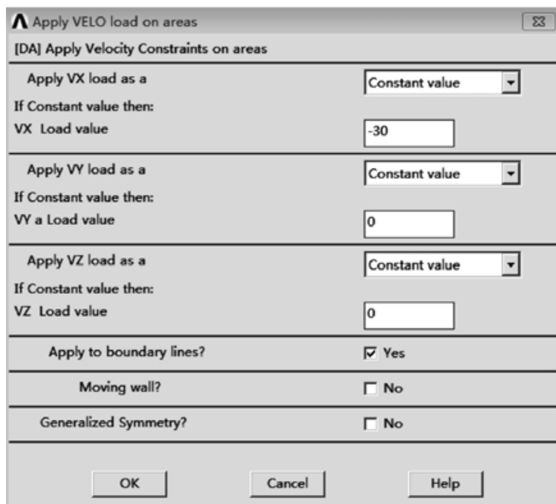


图 19-7　在面处施加速度设置面板

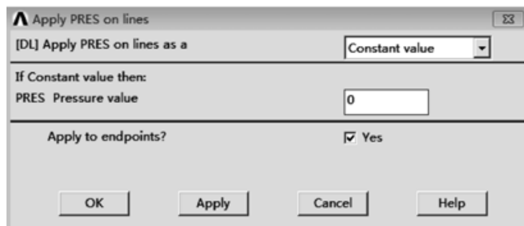


图 19-8　在面处施加压力设置面板

（4）定义顶面边界条件

GUI：Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Fluid/CFD｜Velocity｜On Areas，弹出拾取对话框，拾取面 A32，单击 OK 按钮，弹出图 19-7 所示的在面处施加速度设置面板，设置 VX=0、VY=0 和 VZ=0，单击 OK 按钮。

（5）定义侧面边界条件

GUI：Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Fluid/CFD｜Velocity｜On Areas，弹出拾取对话框，拾取面 A34，单击 OK 按钮，弹出图 19-7 所示的在面处施加速度设置面板，设置 VX=0、VY=0 和 VZ=0，单击 OK 按钮。

（6）定义汽车表面边界条件

1）选择汽车的所有表面。

GUI：Utility Menu｜Select｜Entities，弹出图 19-9 所示的选择实体设置面板，设置选择的实体类型为面（Areas），其他保持默认设置，单击 OK 按钮，弹出图 19-10 所示的拾取面对话框，选择方法为最大值到最小值（Min，Max，Inc），在文本框输入“35,52,1”，单击 OK 按钮。



图 19-9　选择实体设置面板

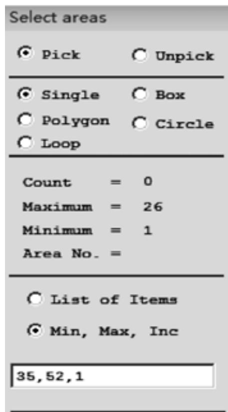


图 19-10　拾取面对话框

2）在选择的面上施加速度。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Areas，弹出拾取对话框，单击 Pick All，弹出图 19-8 所示的在面处施加速度设置面板，设置 VX=0、VY=0 和 VZ=0，单击 OK 按钮。

3）选择所有实体。

GUI：Utility Menu | Select | Everything

（7）定义对称面边界条件

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Areas，弹出拾取对话框，拾取面 A29，单击 OK 按钮，弹出图 19-11 所示的在面处施加速度设置面板，不设置 VX、VY 和 VZ 值，勾选产生对称面选项（Generalized Symmetry），单击 OK 按钮。

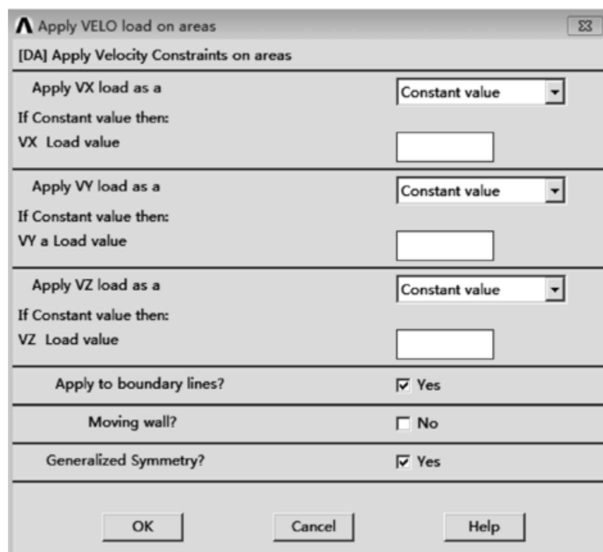


图 19-11　在面处施加速度设置面板

2．设置流体求解选项

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Solution Options，弹出图 19-12 所示的流体求解选项设置面板，设置 TURB 选项为 Turbulent，即流体流动状态为湍流，其他选项保持默认值，单击 OK 按钮。

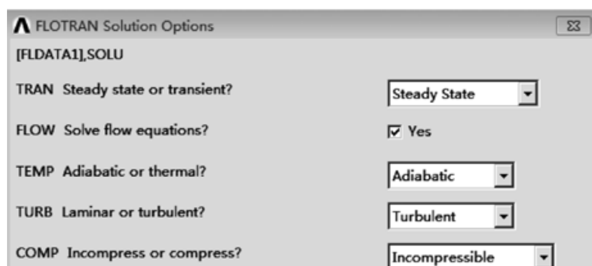


图 19-12　流体求解选项设置面板



3．设置求解控制

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Execution Ctrl，弹出图 19-13 所示的稳态求解控制设置面板，设置总体迭代次数（Global iterations）为 16，单击 OK 按钮。

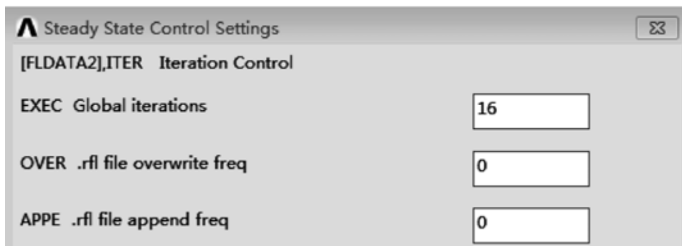


图 19-13 稳态求解控制设置面板

4．设置计算结果输出

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Additional Out | RFL Out Derived，弹出图 19-14 所示的导出量输出控制面板，勾选面板上的所有选项，单击 OK 按钮。

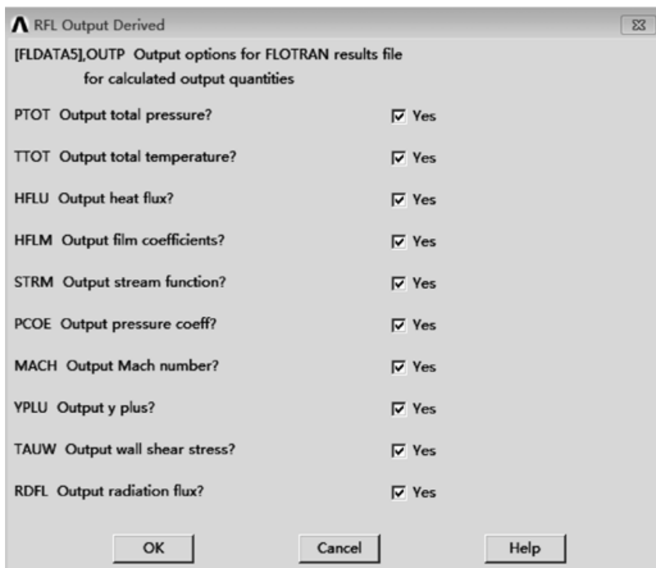


图 19-14 导出量输出控制面板

5．设置流体属性参数

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Fluid Properties，弹出图 19-15 所示的流体属性参数设置面板，设置密度和粘度选项都为国际单元的空气参数（AIR-SI），单击 OK 按钮。

6．设置流体环境

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Flow Enviroement | Gravity，弹出图 19-16 所示的流体重力设置面板，因为考虑流体竖直向下的重力，因此设置 *Y* 方向加速度为 9.8，单击 OK 按钮。

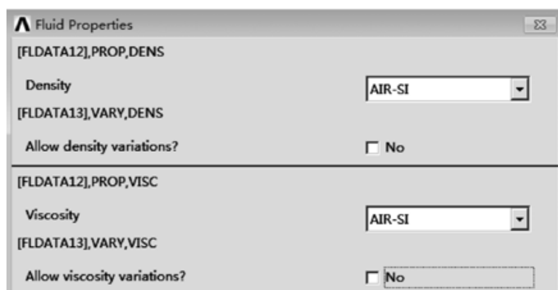


图 19-15 流体属性参数设置面板

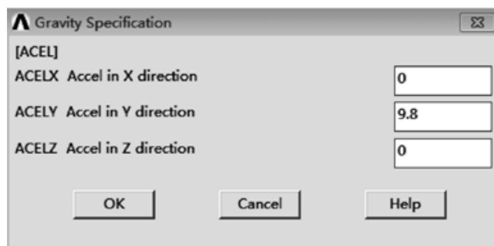


图 19-16 流体重力设置面板

7．设置压力方程求解器

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | CFD Solver Controls | PRES Solver CFD，弹出图 19-17 所示的压力方程求解器设置面板，选择求解方法为 TDMA，单击 OK 按钮，弹出图 19-18 所示的 TDMA 方法迭代次数设置面板，设置迭代次数为 300，单击 OK 按钮。

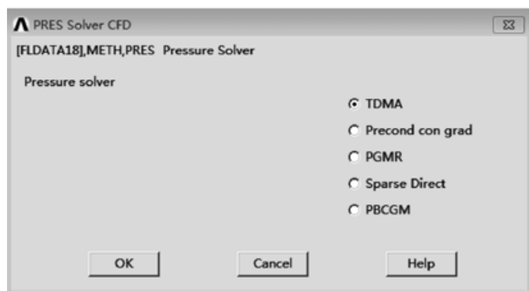


图 19-17 压力方程求解器设置面板

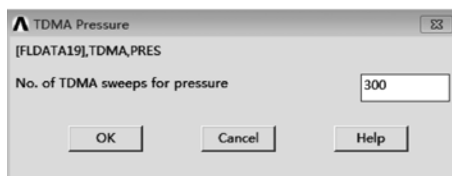


图 19-18 TDMA 方法迭代次数设置面板

8．设置流体湍流模型

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Turbulence | Turbulence Model，弹出图 19-19 所示的流体湍流模型设置面板，选择湍流模型为 RNG，单击 OK 按钮，弹出 RNG 湍流模型相应的计算参数设置面板，保持默认设置，单击 OK 按钮。

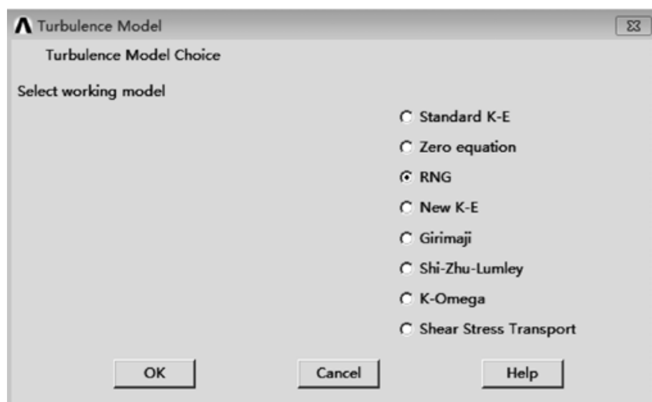


图 19-19 流体湍流模型设置面板

9．设置求解流体对流项算法

GUI：Main Menu｜Solution｜FLOTRAN Set Up｜Advection，弹出图 19-20 所示的流体对流项求解算法设置面板，设置湍流方程的算法为 MSU，单击 OK 按钮。

10．求解

GUI：Main Menu｜Solution｜Run FLOTRAN，开始求解。

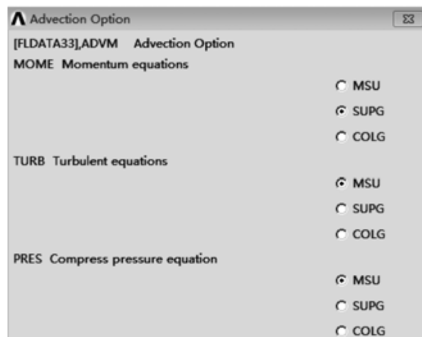


图 19-20 流体对流项求解算法设置面板

19.2.2 后处理

图 19-21～图 19-28 所示为汽车动力学的流场压力、速度、湍流动能、迹线和壁面参数 Y+的云图，具体查看操作，用户可以参见本章的视频教程。

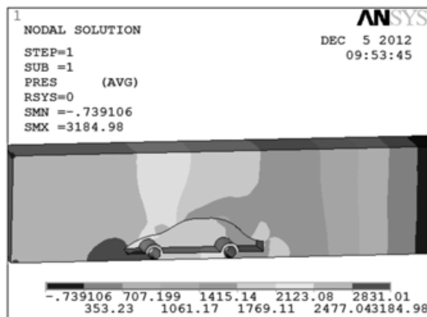


图 19-21 流场压力云图

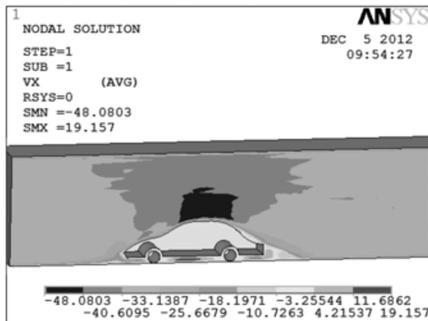


图 19-22 流场 *X* 方向速度云图

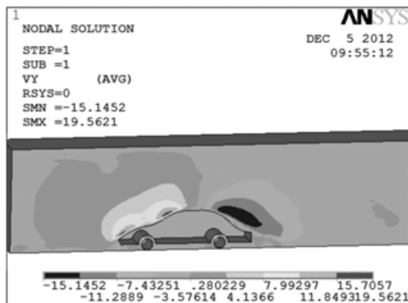


图 19-23 流场 *Y* 方向速度云图

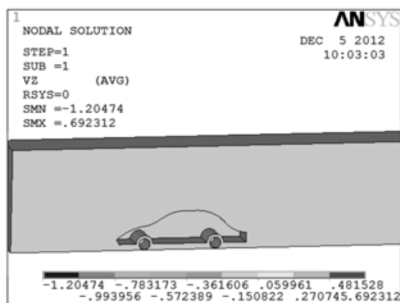


图 19-24 流场 *Z* 方向速度云图

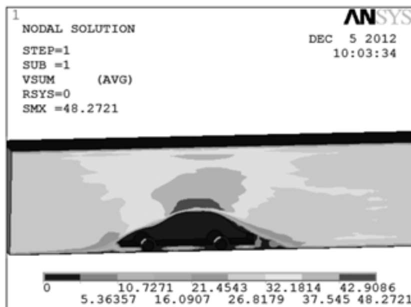


图 19-25 流场速度云图

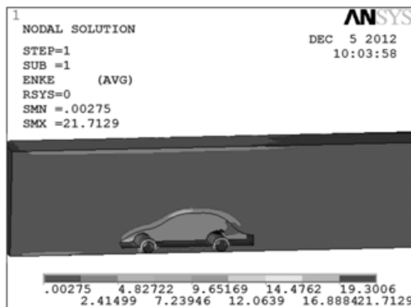


图 19-26 流场湍流动能云图

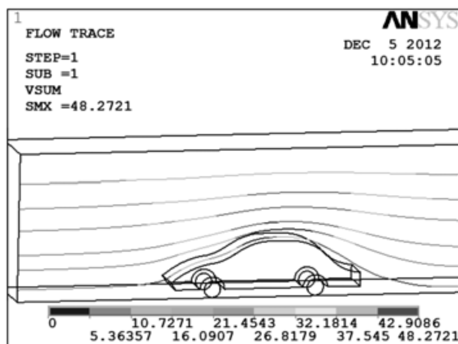


图 19-27　流场速度迹线云图

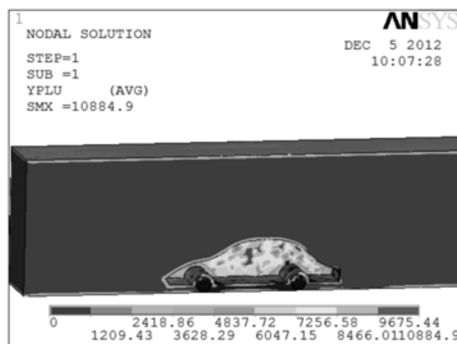


图 19-28　流场壁面参数 Y+云图

19.3　命令流

```
/FILNAME,Automotive aerodynamics ,0
!导热 CAD 模型
/CLEAR,NOSTART   ! Clear model since no SAVE found
! WE SUGGEST YOU REMOVE THIS LINE AND THE FOLLOWING STARTUP LINES
/input,menust,tmp,'',,,,,,,,,,,,,,,,1
/GRA,POWER
/GST,ON
/PLO,INFO,3
/GRO,CURL,ON
/CPLANE,1
/REPLOT,RESIZE
WPSTYLE,,,,,,,,0
/AUX15
IOPTN,IGES,SMOOTH
IOPTN,MERGE,YES
IOPTN,SOLID,YES
IOPTN,SMALL,YES
IOPTN,GTOLER, DEFA
IGESIN,'car','IGS',' '
VPLOT
!进入前处理
/PREP7
!定义流体单元
ET,1,142
!划分网格
ESIZE,0.09
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
SMRT,4
```

```
VMESH,ALL
!进入求解
/SOL
!定义入口边界条件
DA,31,VX,-30,1
DA,31,VY,0,1
DA,31,VZ,0,1
!定义出口边界条件
DA,33,PRES,0,1
DA,30,VX,0,1
DA,30,VY,0,1
DA,30,VZ,0,1
DA,32,VX,0,1
DA,32,VY,0,1
DA,32,VZ,0,1
DA,34,VX,0,1
DA,34,VY,0,1
DA,34,VZ,0,1
ASEL,S, , ,35,52
DA,ALL,VX,0,1
DA,ALL,VY,0,1
DA,ALL,VZ,0,1
ALLSEL,ALL
ASEL,S, ,,27,28
DA,ALL,VX,0,1
DA,ALL,VY,0,1
DA,ALL,VZ,0,1
ALLSEL,ALL
DA,29,ENDS,-1 !施加对称边界条件
!设置流体求解选项
FLDATA1,SOLU,FLOW,1
FLDATA1,SOLU,TURB,1
!设置求解控制
FLDATA2,ITER,EXEC,16,
!设置计算结果输出
FLDATA5,OUTP,PTOT,1
FLDATA5,OUTP,TTOT,1
FLDATA5,OUTP,HFLU,1
FLDATA5,OUTP,HFLM,1
FLDATA5,OUTP,STRM,1
FLDATA5,OUTP,PCOE,1
FLDATA5,OUTP,MACH,1
FLDATA5,OUTP,YPLU,1
FLDATA5,OUTP,TAUW,1
FLDATA5,OUTP,RDFL,1
```



```
!设置流体属性参数
FLDATA7,PROT,DENS,AIR
FLDATA7,PROT,VISC,AIR
ACEL,0,9.8,0,   !考虑流体重力
!设置压力方程求解器
FLDATA18,METH,PRES,1
FLDATA19,TDMA,PRES,300,
!选择流体的湍流模型
FLDATA24,TURB,MODL,3
!设置求解流体对流项算法
FLDATA,ADVM,TURB,MSU
!开始求解
SOLVE
```

第 20 章　三种混合体传输流动分析

20.1　问题的描述

20.1.1　几何模型

图 20−1 所示为混合气体传输流动模型，该模型中包括入口 1、入口 2 和入口 3 三个入口，以及一个出口。入口 1 流入的气体为纯 O_2，入口 2 流入的气体为纯 N_2，入口 3 流入的气体为纯 H_2。

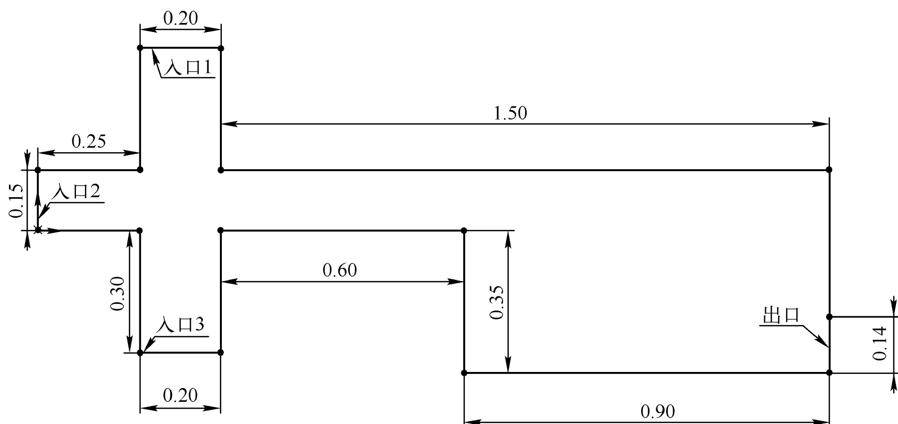


图 20−1　混合气体传输流动模型

20.1.2　流体属性参数

因为该实例需要计算流体流动中的能量方程，因此需要输入气体的密度、粘度、导热系数和比热容。O_2 的密度变化规律符合下式

$$\rho = \rho_N \frac{P}{C_2^p} \frac{C_1^p}{T} \tag{20-1}$$

其中，计算时取 ρ_N =1.2998kg/m^3，C_1^p =300，C_2^p =1.01325×10^5。粘度为常数，其数值为 1.2067×10^{-5}kg/(m/s)，导热系数为常数，其数值为 0.02674 W/(m/℃)，质量扩散系数为 2.149×10^{-5}。摩尔权重数为 31.999，名义质量分数为 0.3。N_2 的密度变化规律也符合式（20−1），计算时取 ρ_N =1.1381kg/m^3，C_1^p =300，C_2^p =1.01325×10^5。粘度为常数，其数值为 1.786×10^{-5}，导热系数为常数，其数值为 0.02598W/(m/℃)，质量扩散系数为 1.601×10^{-5}，摩尔权重数为 28.018，名义质量分数为 0.3。H_2 的密度变化规律也符合式（20−1），计算时取

$\rho_N=0.0819\text{kg/m}^3$，$C_1^p=300$，$C_2^p=1.01325\times10^5$。粘度为常数，其数值为 8.94×10^{-6}，导热系数为常数，其数值为 0.1815 W/(m/℃)，质量扩散系数为 4.964×10^{-5}，摩尔权重数为 2.016，名义质量分数为 0.4。三种气体的比热容都取 AIR-SI。



20.1.3 选择单元

本实例选用三维流体单元 FLUID141 单元。

20.1.4 流体流动模型

该实例假设流体的流动状态为湍流，并且使用 RNG 湍流模型。

20.1.5 边界条件及载荷

入口 1 的入口速度为 VX=0，VY=−2m/s，入口温度为 320K；入口 2 的入口速度为 VX=5m/s，VY=0，入口温度为 500；入口 3 的入口速度为 VX=0，VY=8m/s，入口温度为 400K。出口的压力为 0，壁面为无滑移边界条件。

20.2 GUI 操作

20.2.1 前处理

1．定义文件名

GUI：Utility Menu | File | Change Jobname，弹出一个对话框，在文本框中输入“THREE MIXED GAS TRANSMISSION”，单击 OK 按钮。

2．选择单元

（1）定义单元

GUI：Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击 Add 按钮，弹出图 20−2 所示的选择单元对话框，选择左侧中的 FLOTRAN CFD 项，然后在右边选择 2D FLOTRAN 141 项，单击 OK 按钮。

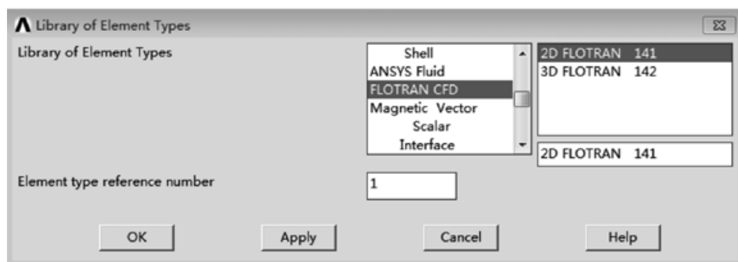


图 20−2 选择单元对话框

（2）设置单元关键字

在单元类型对话框中选择 FLUID141，然后单击 Options 按钮，弹出图 20−3 所示的 FULID141 单元关键字设置面板，将组分数（Number of species）设置为 3，单击 OK 按钮，

返回单元类型界面，单击 Close 按钮。

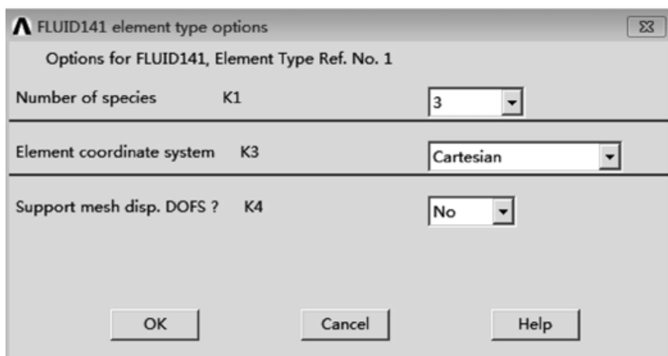


图 20−3　FULID141 单元关键字设置面板

3．建立模型

（1）定义关键点

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS，弹出图 20−4 所示的在激活坐标系中定义关键点面板，在面板中关键点号（Keypoint number）文本框中输入“1”，在激活的坐标系中设置 X=0、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 2，X=0.25、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 3，X=0.25、Y=−0.3、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 4，X=0.45、Y=−0.3、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 5，X=0.45、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 6，X=1.05、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 7，X=1.05、Y=−0.35、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 8，X=1.95、Y=−0.35、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 9，X=1.95、Y=−0.20、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 10，X=1.95、Y=0.15、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 11，X=0.45、Y=0.15、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 12，X=0.45、Y=0.45、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 13，X=0.25、Y=0.45、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 14，X=0.25、Y=0.15、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 15，X=0、Y=0.15、Z=0，单击 OK 按钮。

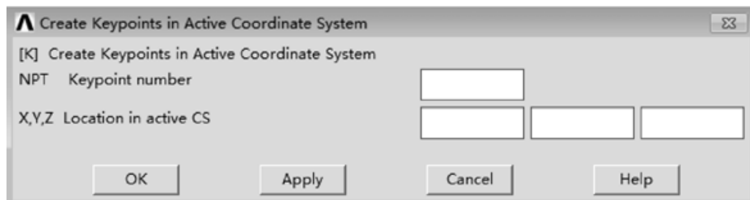


图 20−4　在激活坐标系中定义关键点面板

（2）定义面

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | Through KPs，弹出图 20−5 所示的拾取对话框，在文本框中输入关键点编号为“1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15”，单击 OK 按钮。

4．网格划分

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Meshing｜MeshTool

（2）设置总体网格尺寸

选择如图 20-6 所示的网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设置（Set）按钮，弹出图 20-7 所示的总体网格尺寸设置面板。

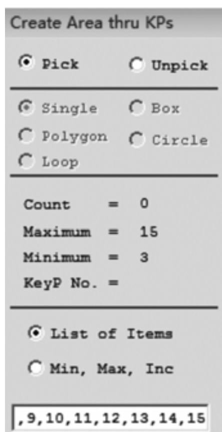


图 20-5　拾取对话框



图 20-6　网格划分工具面板中尺寸控制子面板

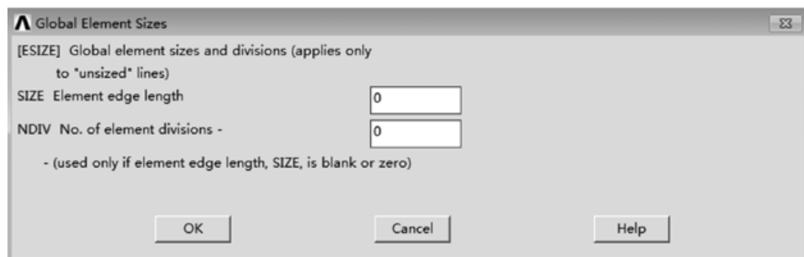


图 20-7　总体网格尺寸设置面板

该设置面板中存在两个控制选项，即单元尺寸控制（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸文本框中输入“0.009”，单击 OK 按钮。

（3）划分网格

选择网格划分工具面板上的网格划分（Mesh）按钮，弹出拾取对话框，单击 Pick All 按钮。

5．设置多组分属性参数

（1）定义 O_2 的属性参数

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜FLOTRAN Set Up｜Multiple Species，弹出图 20-8 所示的多组分设置面板，保持默认设置，单击 OK 按钮，弹出图 20-9 所示的多组分求解设置面板；选择组分号为 1（Species#1），选择组分设置类型为通用（General），单击 OK 按钮，弹出图 20-10 所示的多组分通用设置面板；设置组分名（Species name）为 O_2，摩尔权重数（Molecular weight）为 31.999，名义质量分数（Nominal mass fraction）为

0.3，单击 OK 按钮，返回图 20−9 所示的多组分求解设置面板；继续选择组分的属性（Properties），单击 OK 按钮，弹出图 20−11 所示的多组分属性设置面板；选择属性设置类型为密度，单击 OK 按钮，弹出图 20−12 所示的密度属性定义面板；设置密度类型为 GAS，名义密度为 1.2998，第一系数为 300，第二系数为 101325，并设置密度为可变（Vary density），单击 OK 按钮，返回图 20−11 所示的多组分属性设置面板；选择属性设置类型为粘度，单击 OK 按钮，弹出图 20−13 所示的粘度属性定义面板；设置粘度类型为 CONSTANT，名义粘度为 1.2067×10^{-5}，单击 OK 按钮，返回图 20−11 所示的多组分属性设置面板；选择属性设置类型为导热系数，单击 OK 按钮，弹出图 20−14 所示的导热属性定义面板；设置导热类型为 CONSTANT，名义粘度为 1.2067×10^{-5}，单击 OK 按钮，返回图 20−11 所示的多组分属性设置面板；选择属性设置类型为质量扩展系数，弹出图 20−15 所示的质量扩散系数定义面板；设置质量扩散类型为 CONSTANT，设置名义值为 2.149×10^{-5}，单击 OK 按钮。

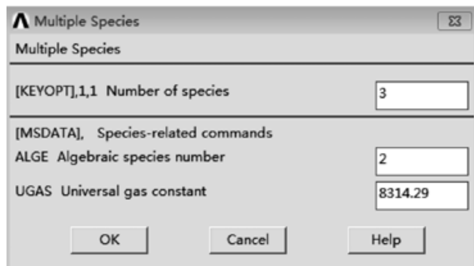


图 20−8　多组分设置面板



图 20−9　多组分求解设置面板

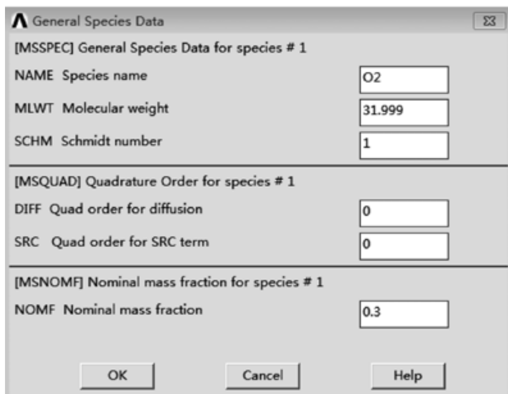


图 20−10　多组分通用设置面板

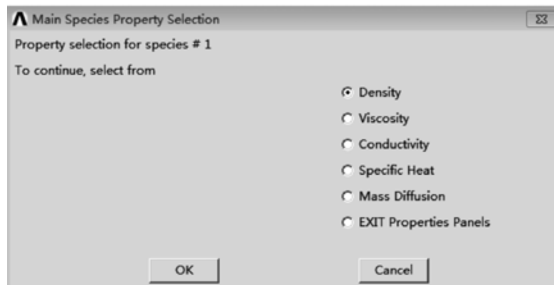


图 20−11　多组分属性设置面板

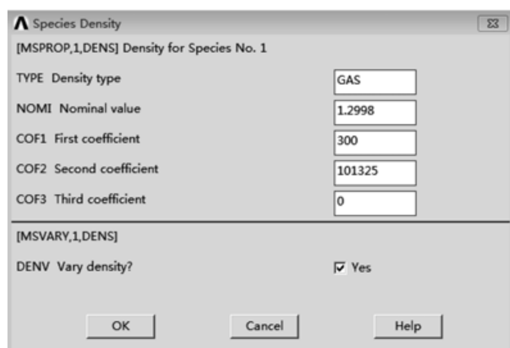


图 20-12　密度属性定义面板

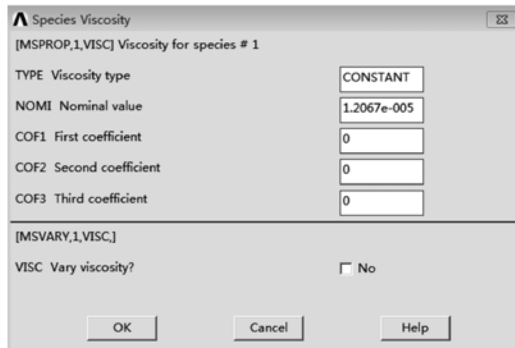


图 20-13　粘度属性定义面板

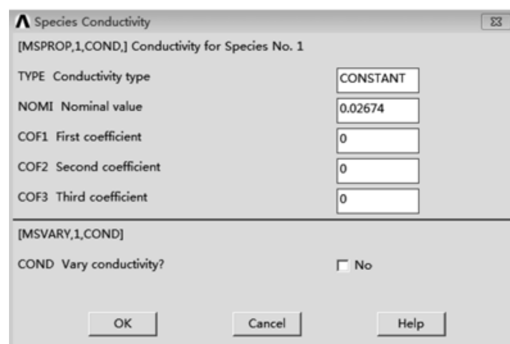


图 20-14　导热属性定义面板

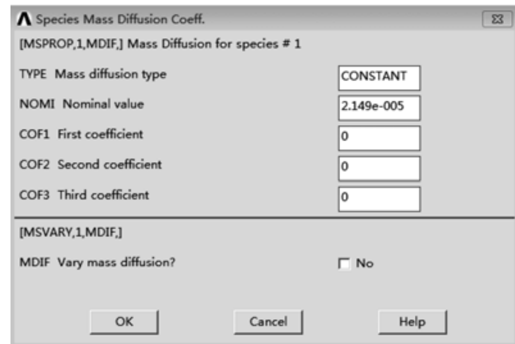


图 20-15　质量扩散系数定义面板

（2）定义 O_2 的计算上限值

选中图 20-9 所示的多组分求解设置面板中的 Capping 项，单击 OK 按钮，弹出图 20-16 所示的组分质量分数限制值设置面板，设置最大上限值为 1，单击 OK 按钮。

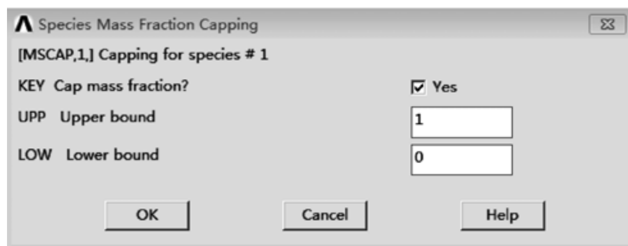


图 20-16　组分质量分数限制值设置面板

（3）定义 N_2 的属性参数

GUI：Main Menu | Preprocessor | FLOTRAN Set Up | Multiple Species，弹出图 20-8 所示的多组分设置面板，保持默认设置，单击 OK 按钮，弹出图 20-9 所示的多组分求解设置面板；选择组分号为 2（Species#2），选择组分设置类型为通用（General），单击 OK 按钮，弹出图 20-10 所示的多组分通用设置面板；设置组分名（Species name）为 N_2，摩尔权重数（Molecular weight）为 28.018，名义质量分数（Nominal mass fraction）为 0.3，单击 OK 按钮，返回图 20-9 所示的多组分求解设置面板；继续选择组分的属性（Properties），单击 OK

按钮，弹出图 20−11 所示的多组分属性设置面板；选择属性设置类型为密度，单击 OK 按钮，弹出图 20−12 所示的密度属性定义面板板；设置密度类型为 GAS，名义密度为 1.1381，第一系数为 300，第二系数为 101325，并设置密度为可变（Vary density），单击 OK 按钮，返回如图 20−11 所示的多组分属性设置面板；选择属性设置类型为粘度，单击 OK 按钮，弹出图 20−13 所示的粘度属性定义面板；设置粘度类型为 CONSTANT，名义粘度为 1.786×10^{-5}，单击 OK 按钮，返回图 20−11 所示的多组分属性设置面板；选择属性设置类型为导热系数，单击 OK 按钮，弹出图 20−14 所示的导热属性定义面板；设置导热类型为 CONSTANT，名义粘导热系数为 0.02598，单击 OK 按钮，返回图 20−11 所示的多组分属性设置面板；选择属性设置类型为质量扩展系数，弹出图 20−15 所示的质量扩散系数定义面板；设置质量扩散类型为 CONSTANT，设置名义值为 1.601×10^{-5}，单击 OK 按钮。

（4）定义 N_2 的计算上限值

选中如图 20−9 所示的多组分求解设置面板中的 Capping，单击 OK 按钮，弹出图 20−16 所示的组分质量份数限制值设置面板，设置最大上限值为 1，单击 OK 按钮。

（5）定义 H_2 的属性参数

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜FLOTRAN Set Up｜Multiple Species，弹出图 20−8 所示的多组分设置面板，保持默认设置，单击 OK 按钮，弹出图 20−9 所示的多组分求解设置面板；选择组分号为 3（Species#3），选择组分设置类型为通用（General），单击 OK 按钮，弹出图 20−10 所示的多组分通用设置面板；设置组分名（Species name）为 H_2，摩尔权重数（Molecular weight）为 2.016，名义质量分数（Nominal mass fraction）为 0.4，单击 OK 按钮，返回图 20−9 所示的多组分求解设置面板；继续选择组分的属性（Properties），单击 OK 按钮，弹出图 20−11 所示的多组分属性设置面板；选择属性设置类型为密度，单击 OK 按钮，弹出图 20−12 所示的密度属性定义面板；设置密度类型为 GAS，名义密度为 0.0819，第一系数为 300，第二系数为 101325，并设置密度为可变（Vary density），单击 OK 按钮，返回图 20−11 所示的多组分属性设置面板；选择属性设置类型为粘度，单击 OK 按钮，弹出图 20−13 所示的粘度属性定义面板；设置粘度类型为 CONSTANT，名义粘度为 8.94×10^{-6}，单击 OK 按钮，返回图 20−11 所示的多组分属性设置面板；选择属性设置类型为导热系数，单击 OK 按钮，弹出图 20−14 所示的导热属性定义面板；设置导热类型为 CONSTANT，名义导热系数为 0.1815，单击 OK 按钮，返回图 20−11 所示的多组分属性设置面板；选择属性设置类型为质量扩展系数，弹出图 20−15 所示的质量扩散系数定义面板；设置质量扩散类型为 CONSTANT，设置名义值为 4.964×10^{-5}，单击 OK 按钮。

（6）定义 H_2 的计算上限值

选中如图 20−9 所示的多组分求解设置面板中的 Capping 项，单击 OK 按钮，弹出图 20−16 所示的组分质量分数限制值设置面板，设置最大上限值为 1，单击 OK 按钮。

20.2.2 求解

1．定义流体边界条件

（1）定义入口 1 边界条件

1）定义入口 1 速度。

GUI：Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Fluid/CFD｜Velocity｜On Lines，弹

出拾取对话框，拾取线 L12，单击 OK 按钮，弹出图 20-17 所示的在线处施加速度设置面板，设置 VX=0、VY=-2，单击 OK 按钮。

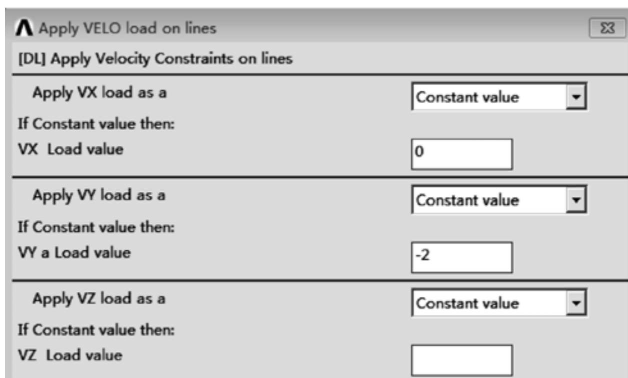


图 20-17　在线处施加速度设置面板

2）定义入口 1 的温度。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Thermal | Temperature | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L12，单击 OK 按钮，弹出图 20-18 所示的在线处施加温度设置面板，选择约束的自由度类型为 TEMP，设置约束值为 320，单击 OK 按钮。

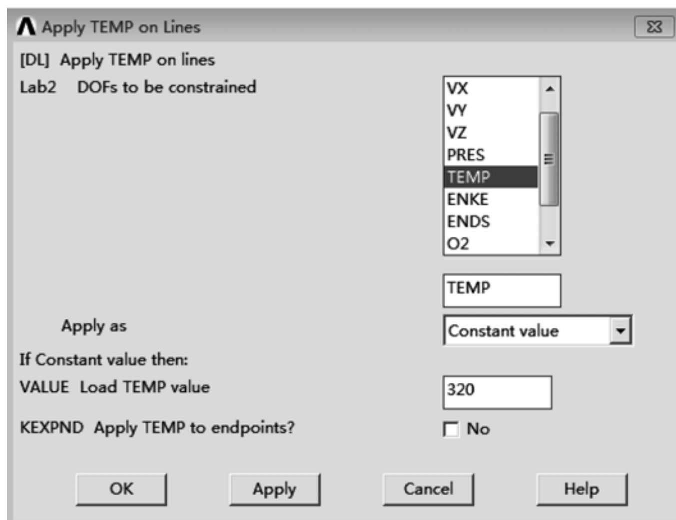


图 20-18　在线处施加温度设置面板

3）定义入口 1 的组分。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Species | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L12，单击 OK 按钮，弹出图 20-19 所示的在线上施加质量分数约束设置面板；选择组分 1，单击 OK 按钮，弹出图 20-20 所示的在线上施加 O_2 质量分数设置面板；设置质量分数为 1，单击 OK 按钮，弹出返回操作设置面板，勾选 Use the same selection again 项，返回到图 20-19 所示的在线上施加质量分数约束设置

面板；选择组分 2，单击 OK 按钮，弹出图 20−21 所示的在线上施加 N_2 质量分数设置面板；设置质量分数为 0，单击 OK 按钮，弹出返回操作设置面板，勾选 Use the same selection again 项，返回到图 20−19 所示的在线上施加质量分数约束设置面板；选择组分 3，单击 OK 按钮，弹出图 20−22 所示的在线上施加 H_2 质量分数设置面板，设置质量分数为 0，单击 OK 按钮。

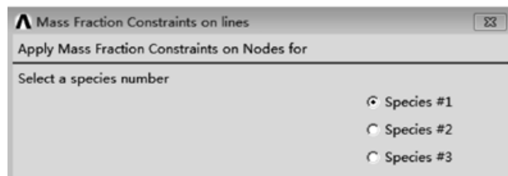


图 20−19　在线上施加质量分数约束设置面板

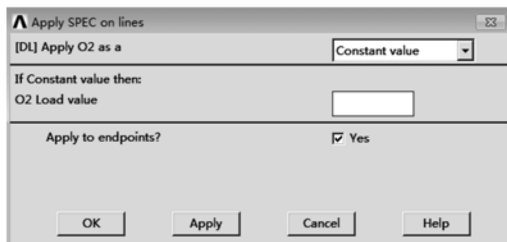


图 20−20　在线上施加 O_2 质量分数设置面板

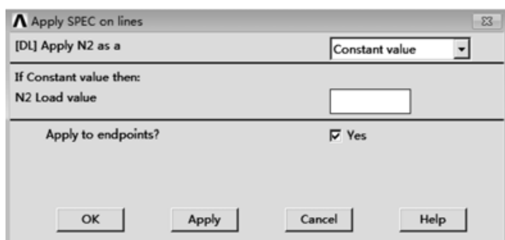


图 20−21　在线上施加 N_2 质量分数设置面板

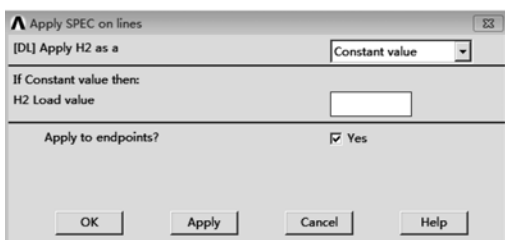


图 20−22　在线上施加 H_2 质量分数设置面板

（2）定义入口 2 边界条件

1）定义入口 2 速度。

GUI：Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Fluid/CFD｜Velocity｜On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L15，单击 OK 按钮，弹出图 20−17 所示的在线处施加速度设置面板，设置 VX=5、VY=0，单击 OK 按钮。

2）定义入口 2 的温度。

GUI：Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Thermal｜Temperature｜On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L15，单击 OK 按钮，弹出图 20−18 所示的在线处施加温度设置面板，选择约束的自由度类型为 TEMP，设置约束值为 500，单击 OK 按钮。

3）定义入口 2 的组分。

GUI：Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Fluid/CFD｜Species｜On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L15，单击 OK 按钮，弹出图 20−19 所示的在线上施加质量分数约束设置面板；选择组分 1，单击 OK 按钮，弹出图 20−20 所示的在线上施加 O_2 质量分数设置面板；设置质量分数为 0，单击 OK 按钮，弹出返回操作设置面板，勾选 Use the same selection again 项，返回到图 20−19 所示的在线上施加质量分数约束设置面板；选择组分 2，单击 OK 按钮，弹出图 20−21 所示的在线上施加 N_2 质量分数设置面板；输入质量分数为 1，单击 OK 按钮，弹出返回操作设置面板，勾选 Use the same selection again 项，返回到图 20−19 所示的在线上施加质量分数约束设置面板；选择组分 3，单击 OK 按钮，弹出图 20−22 所示的在线

上施加 H_2 质量分数设置面板，设置质量分数为 0，单击 OK 按钮。

（3）定义入口 3 边界条件

1）定义入口 3 速度。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L3，单击 OK 按钮，弹出图 20-17 所示的在线处施加速度设置面板，设置 VX=0、VY=8，单击 OK 按钮。

2）定义入口 3 的温度。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Thermal | Temperature | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L3，单击 OK 按钮，弹出图 20-18 所示的在线处施加温度设置面板，选择约束的自由度类型为 TEMP，设置约束值为 400，单击 OK 按钮。

3）定义入口 3 的组分。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Species | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L3，单击 OK 按钮，弹出图 20-19 所示的在线上施加质量分数约束设置面板；选择组分 3，单击 OK 按钮，弹出图 20-20 所示的在线上施加 O_2 质量分数设置面板；设置质量分数为 0，单击 OK 按钮，弹出返回操作设置面板，勾选 Use the same selection again 项，返回到图 20-19 所示的在线上施加质量分数约束设置面板；选择组分 2，单击 OK 按钮，弹出图 20-21 所示的在线上施加 N_2 质量分数设置面板；输入质量分数为 0，单击 OK 按钮，弹出返回操作设置面板，勾选 Use the same selection again 项，返回到图 20-19 所示的在线上施加质量分数约束设置面板；选择组分 3，单击 OK 按钮，弹出如图 20-22 所示的在线上施加 H_2 质量分数设置面板，设置质量分数为 1，单击 OK 按钮。

（4）定义壁面条件

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L1、L2、L4、L5、L6、L7、L9、L10、L11、L13 和 L14，单击 OK 按钮，弹出图 20-17 所示的在线处施加速度设置面板，设置 VX=0、VY=0，单击 OK 按钮。

（5）定义出口条件

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Pressure DOF | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L8，单击 OK 按钮，弹出图 20-23 所示的在线处施加压力设置面板，设置压力为 0，单击 OK 按钮。

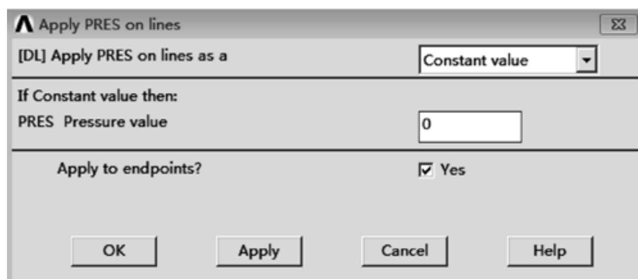


图 20-23 在线处施加压力设置面板

2．设置流体求解选项

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Solution Options，弹出图 20-24 所示

的流体求解选项设置面板，设置 TURB 选项为 Turbulent，即流体流动状态为湍流，设置 TEMP 选项为 Thermal，即求解能量方程，其他选项保持默认值，单击 OK 按钮。

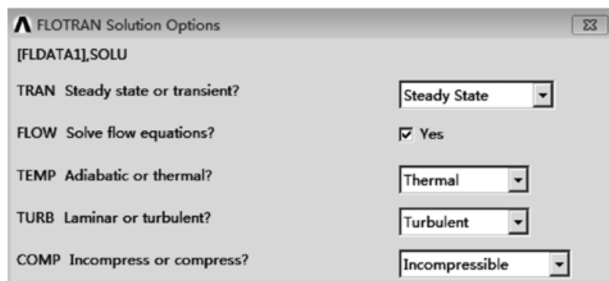


图 20−24　流体求解选项设置面板

3．设置求解控制

GUI：Main Menu｜Solution｜FLOTRAN Set Up｜Execution Ctrl，弹出图 20−25 所示的稳态求解控制设置面板，设置总体迭代次数（Global iterations）为 30，单击 OK 按钮。

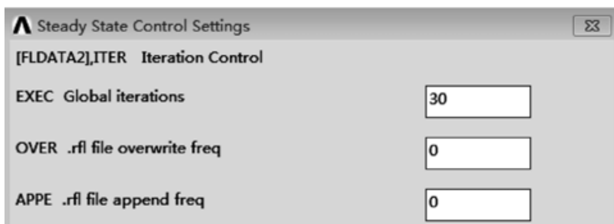


图 20−25　稳态求解控制设置面板

4．设置计算结果输出

GUI：Main Menu｜Solution｜FLOTRAN Set Up｜Additional Out｜RFL Out Derived，弹出图 20−26 所示的导出量输出控制面板，勾选面板上的所有选项，单击 OK 按钮。

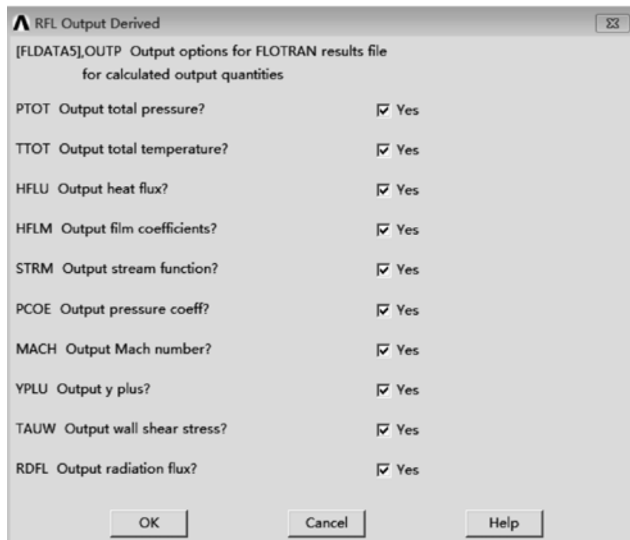


图 20−26　导出量输出控制面板

5．设置流体属性参数

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Fluid Properties，弹出图 20-27 所示的流体属性参数设置面板，设置密度、粘度和导热系数选项都为 CMIX，比热容为国际单元的空气参数（AIR-SI），单击 OK 按钮。

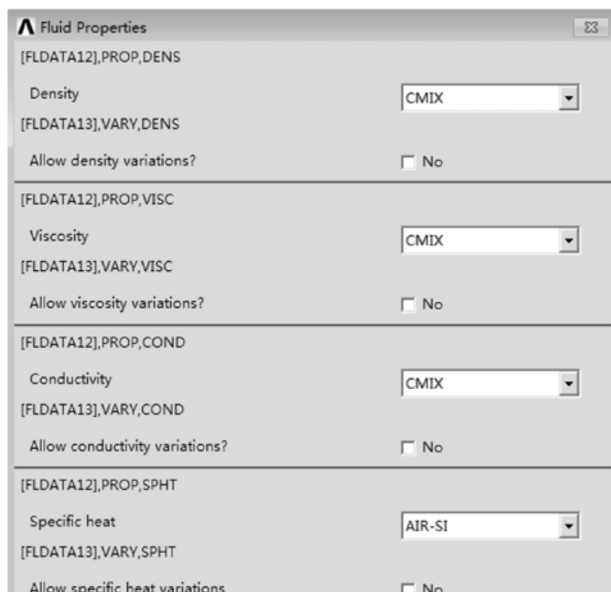


图 20-27　流体属性参数设置面板

6．设置流体湍流模型

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Turbulence | Turbulence Model，弹出图 20-28 所示的流体湍流模型设置面板，选择湍流模型为 RNG，单击 OK 按钮，弹出 RNG 湍流模型相应的计算参数设置面板，保持默认设置，单击 OK 按钮。

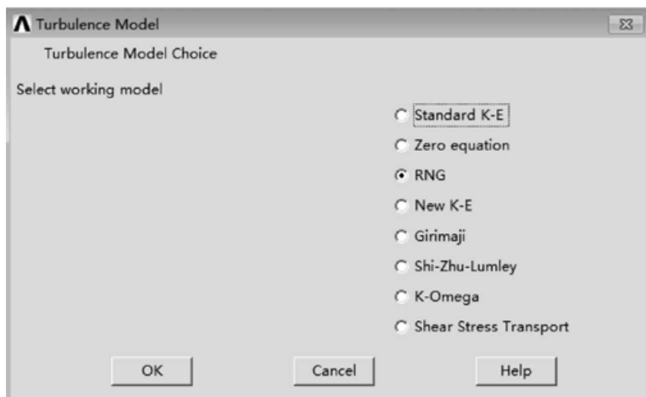


图 20-28　流体湍流模型设置面板

7．求解

GUI：Main Menu | Solution | Run FLOTRAN，开始求解。

20.2.3 后处理

图 20−29～图 20−36 所示分别为混合气体的温度、压力、速度、湍流动能、含量分布和迹线云图，具体的查看方法用户可以参见本章的视频教程。

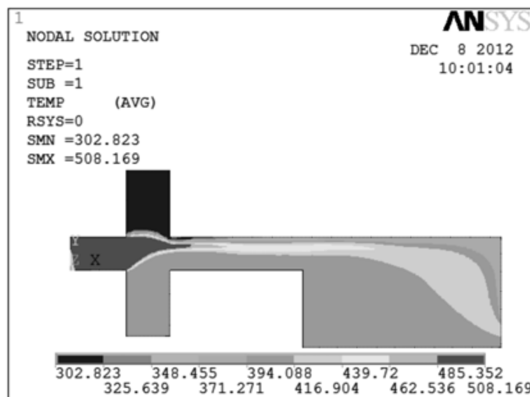


图 20−29 混合气体温度云图

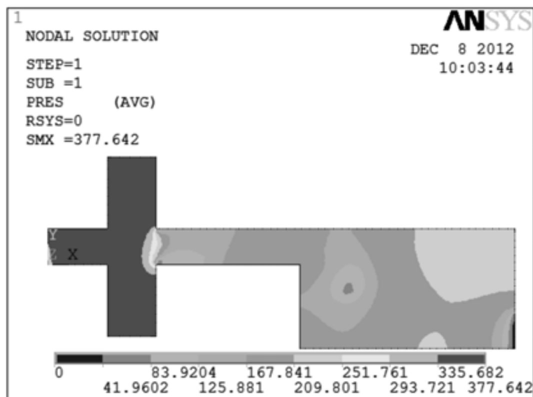


图 20−30 混合气体压力云图

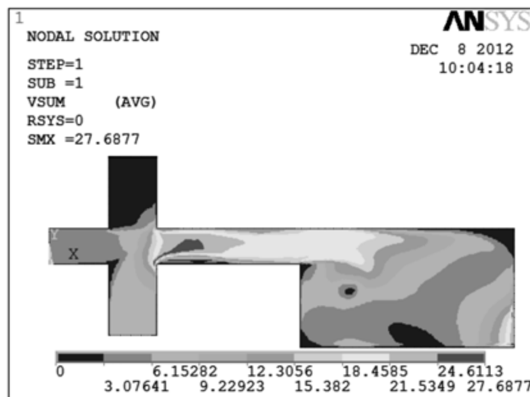


图 20−31 混合气体速度云图

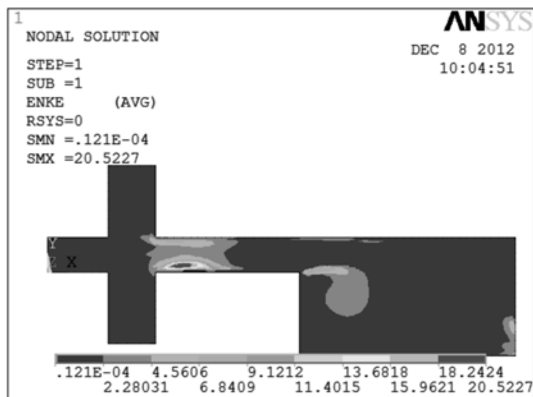


图 20−32 混合气体湍流动能云图

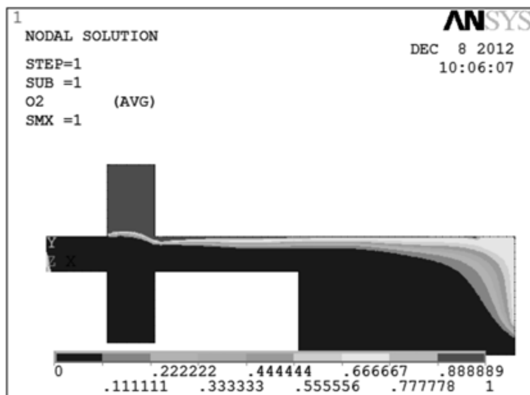


图 20−33 O_2 含量分布云图

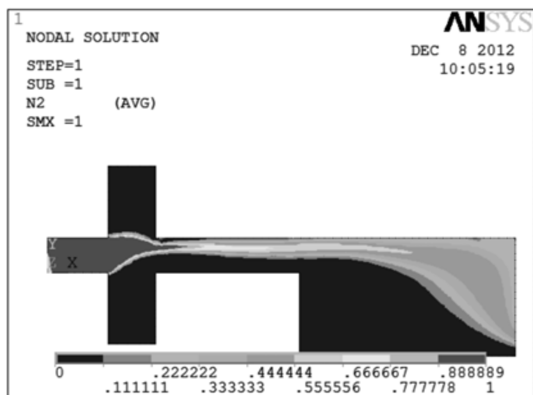


图 20−34 N_2 含量分布云图

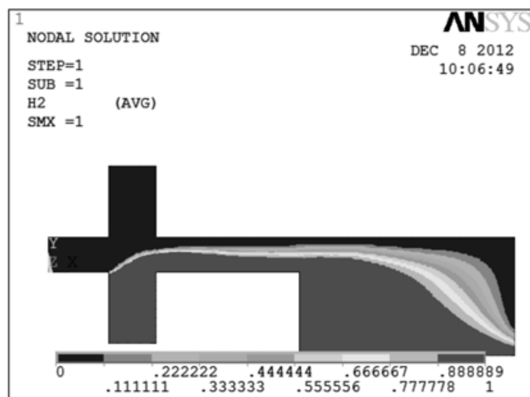


图 20-35 H_2 含量分布云图

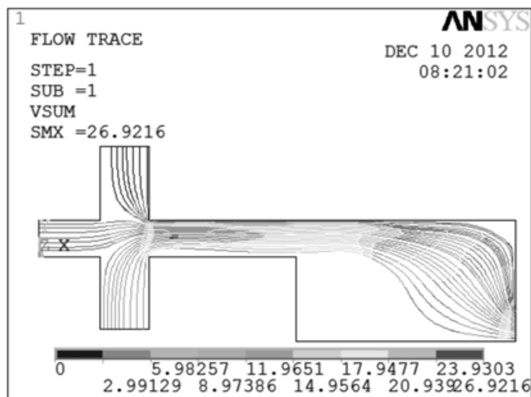


图 20-36 混合气体流场迹线云图

20.3 命令流

```
/FILNAME,Three mixed gas transmission ,0
/PREP7
!定义流体单元
ET,1,141
!设置流体单元关键字，激活三种组分求解
KEYOPT,1,1,3
!建立模型
K,1,0,0,0
K,2,0.25,0
K,3,0.25,-0.3,0
K,4,0.45,-0.3,0
K,5,0.45,0,0
K,6,1.05,0,0
K,7,1.05,-0.35,0
K,8,1.95,-0.35,
K,9,1.95,-0.21,0
K,10,1.95,0.15
K,11,0.45,0.15
K,12,0.45,0.45,0
K,13,0.25,0.45,0
K,14,0.25,0.15,0
K,15,0,0.15,0
A,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15
!划分网格
ESIZE,0.009
AMESH,1
!输入组分流体属性参数
```

```
MSDATA,2,8314.29,
!设置组分 1 的相关参数
MSSPEC,1,O2,31.999,1,
MSNOMF,1,0.3
msprop,1,DENS,GAS,1.2998,300,1.01325E+5
msvary,1,dens,t
msprop,1,VISC,CONSTANT,1.2067E-5
msprop,1,cond,CONSTANT,0.02674
msprop,1,mdif,CONSTANT,2.149E-5
mscap,1,1
!设置组分 2 的相关参数
msspec,2,N2,28.018
msprop,2,DENS,GAS,1.1381,300,1.01325E+5
msvary,2,dens,t
msnomf,2,0.3
msprop,2,VISC,CONSTANT,1.786E-5
msprop,2,mdif,CONSTANT,1.601E-5
msprop,2,cond,CONSTANT,0.02598
mscap,2,1
!设置组分 3 的相关参数
msspec,3,H2,2.016
msprop,3,DENS,GAS,0.0819,300,1.01325E+5
msvary,3,dens,t
msnomf,3,0.4
msprop,3,VISC,CONSTANT,8.94E-6
msprop,3,mdif,CONSTANT,4.964E-5
msprop,3,cond,CONSTANT,0.1815
mscap,3,1
!进入求解
/SOL
!定义入口边界条件
DL,12, ,VX,0,1
DL,12, ,VY,-2,1
DL,12, ,TEMP,320,0
DL,15, ,VX,5,1
DL,15, ,VY,0,1
DL,15, ,TEMP,500,0
DL,3, ,VX,0,1
DL,3, ,VY,8,1
DL,3, ,TEMP,400,0
!定义无滑移壁面边界条件
DL,1, ,VX,0,1
DL,1, ,VY,0,1
DL,2, ,VX,0,1
DL,2, ,VY,0,1
```



```
DL,4, ,VX,0,1
DL,4, ,VY,0,1
DL,5, ,VX,0,1
DL,5, ,VY,0,1
DL,6, ,VX,0,1
DL,6, ,VY,0,1
DL,7, ,VX,0,1
DL,7, ,VY,0,1
DL,9, ,VX,0,1
DL,9, ,VY,0,1
DL,10, ,VX,0,1
DL,10, ,VY,0,1
DL,11, ,VX,0,1
DL,11, ,VY,0,1
DL,13, ,VX,0,1
DL,13, ,VY,0,1
DL,14, ,VX,0,1
DL,14, ,VY,0,1
!定义出口压力
DL,8, ,PRES,0,1
!定义入口组分质量分数
DL,12, ,O2,1,1
DL,12, ,N2,0,1
DL,12, ,H2,0,1
DL,15, ,O2,0,1
DL,15, ,N2,1,1
DL,15, ,H2,0,1
DL,3, ,O2,0,1
DL,3, ,N2,0,1
DL,3, ,H2,1,1
!设置流体求解选项
FLDATA1,SOLU,FLOW,1
FLDATA1,SOLU,TEMP,1
FLDATA1,SOLU,TURB,1
FLDATA1,SOLU,SPEC,1
!设置求解控制
FLDATA2,ITER,EXEC,30,
!设置计算结果输出
FLDATA5,OUTP,PTOT,1
FLDATA5,OUTP,TTOT,1
FLDATA5,OUTP,HFLU,1
FLDATA5,OUTP,HFLM,1
FLDATA5,OUTP,STRM,1
FLDATA5,OUTP,PCOE,1
FLDATA5,OUTP,MACH,1
```

```
FLDATA5,OUTP,YPLU,1
FLDATA5,OUTP,TAUW,1
FLDATA5,OUTP,RDFL,1
!设置多组分传输流体属性参数
FLDATA7,PROT,DENS,CMIX
FLDATA7,PROT,VISC,CMIX
FLDATA7,PROT,COND,CMIX
FLDATA7,PROT,SPHT,AIR-SI
!选择流体的湍流模型
FLDATA24,TURB,MODL,3
!开始求解
SOLVE
```

第 21 章 稳态流-固双向耦合分析



21.1 问题的描述

21.1.1 几何模型

图 21-1 所示为橡胶与流体相互作用的力学模型，图中流体区域的长度为 7m，宽度为 1.2m，橡胶的高度为 0.45m，宽度为 0.15m，其他几何尺寸如图 21-1 所示。

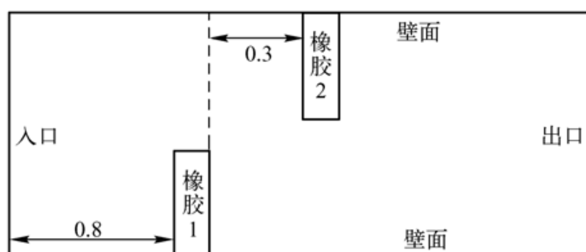


图 21-1 橡胶与流体相互作用的力学模型

21.1.2 流体属性参数

该实例的流体为水，因为不考虑温度，因此只需要给出流体的密度和粘度。水的密度为 1000kg/m^3，粘度为 4.7×10^{-4}kg/（m/s）。

21.1.3 选择单元

本实例选用二维流体单元 FLUID141 单元模拟流体区域，使用 PLANE182 单元模拟橡胶，采用 Mooney-Rivlin 本构方程模拟橡胶的应力-应变关系，其中 C10=0.29×10^6Pa，C01=0.18×10^6Pa，d=1.4×10^{-7}。

21.1.4 流体流动模型

该实例假设流体的流动状态为湍流，并且使用 RNG 湍流模型。

21.1.5 边界条件及载荷

流体边界条件：假设壁面条件为无滑移边界条件，进口初始流速为 1.5m/s，出口的相对压力为 0；结构边界条件：固定约束橡胶块底面。

21.2 GUI 操作

21.2.1 前处理

1．定义文件名

GUI：Utility Menu | File | Change Jobname，弹出一个对话框，在文本框中输入“FLUID-SOLID INTERACTION ANALYSIS”，单击 OK 按钮。

2．选择单元

（1）定义单元

GUI：Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击 Add 按钮，弹出图 21−2 所示的选择单元对话框，选择左侧中的 FLOTRAN CFD 项，然后在右边选择 2D FLOTRAN 141 项，单击 Apply 按钮，继续选择左侧中的 Structural Solid 项，然后在右边选择 Quad 4 node 182 项，单击 OK 按钮。

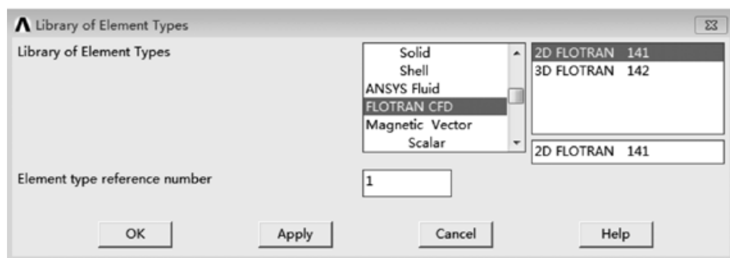


图 21−2　选择单元对话框

（2）设置单元关键字

在单元类型对话框中选择 FLUID141 项。然后单击 Options 按钮，弹出图 21−3 所示的 FULID141 单元关键字设置面板，将支持网格位移自由度选项（Support mesh disp. DOFS）设置为 Yes，单击 OK 按钮，返回单元类型界面，继续在单元类型对话框中选择 PLANE182 项，然后单击 Options 按钮，弹出图 21−4 所示的 PLANE182 单元关键字设置面板，设置单元技术（Element technology）为增强应变选项（Enhanced Strain），单元行为（Element behavior）为平面应变（Plane strain），单元公式（Element formulation）为位移/力混合（Mixed U/P），单击 OK 按钮，返回单元类型界面，单击 Close 按钮。

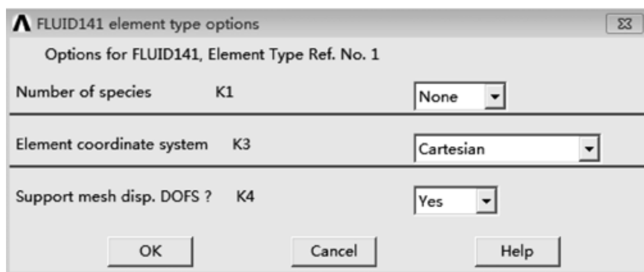


图 21−3　FULID141 单元关键字设置面板

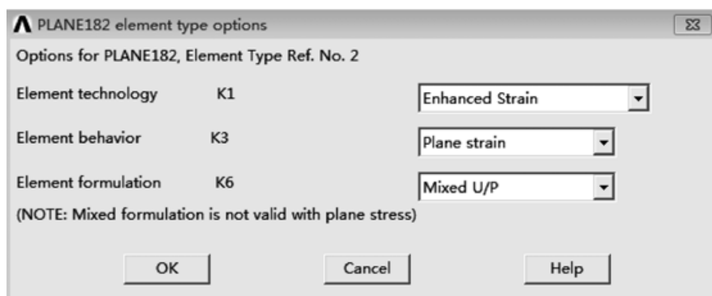


图 21-4 PLANE182 单元关键字设置面板

3．定义材料模型

GUI：Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models，弹出一个对话框，选择 Material | New Modle，在弹出的对话框中输入材料号为 2，选择 Structural | NonLinear | Elastic | Hyperelastic | Mooney-Rivlin | 2 parameters，弹出图 21-5 所示的双参数 Mooey-Rivlin 超弹模型设置面板，设置 $C10=0.29\times10^6$、$C01=0.18\times10^6$，$d=1.4\times10^7$，单击 OK 按钮，关闭对话框，选择 Material | Exit，退出定义材料模型行为的面板。

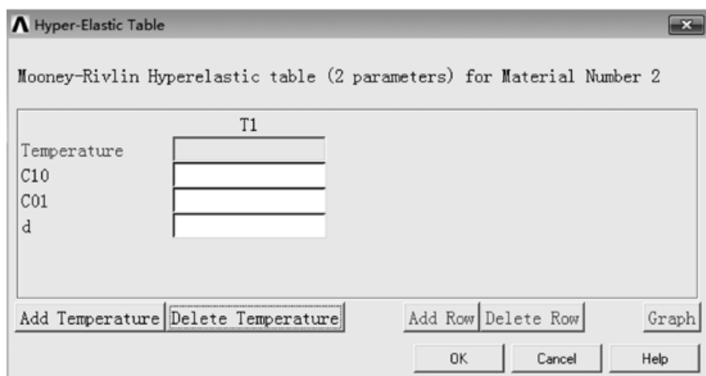


图 21-5 双参数 Mooey-Rivlin 超弹模型设置面板

4．建立模型

（1）定义关键点

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS，弹出图 21-6 所示的在激活坐标系中定义关键点面板，在面板中关键点号（Keypoint number）文本框中输入“1”，在激活的坐标系中设置 X=0、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 2，X=0.8、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 3，X=0.8、Y=0.45、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 4，X=0.95、Y=0.45、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 5，X=0.95、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 6，X=7、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 7，X=7、Y=1.2、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 8，X=1.4、Y=1.2、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 9，X=1.4、Y=0.75、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 10，X=1.25、Y=0.75、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 11，X=1.25、

Y=1.2、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 12，X=0、Y=1.2、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 13，X=0.8、Y=0.45、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 14，X=0.95、Y=0.45、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 15，X=1.4、Y=0.75、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 16，X=1.25、Y=0.75、Z=0，单击 OK 按钮。

（2）定义面

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | Through KPs，弹出图 21-7 所示的拾取对话框，在文本框中输入关键点编号为“1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12”，单击 Apply 按钮，继续在拾取对话框的文本框中输入关键点编号为“2,13,14,5”，单击 Apply 按钮，继续在拾取对话框的文本框中输入关键点编号为“8,15,16,11”，单击 OK 按钮。

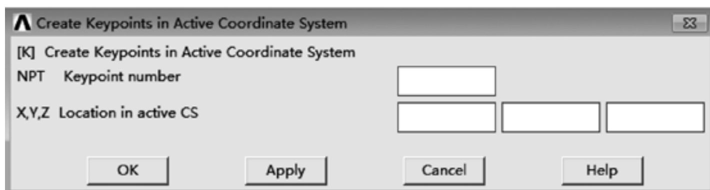


图 21-6　在激活坐标系中定义关键点面板

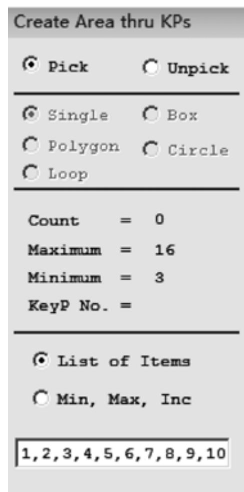


图 21-7　拾取对话框

5．网格划分

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool

（2）设置总体网格尺寸

选择图 21-8 所示的网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设置（Set）按钮，弹出图 21-9 所示的总体网格尺寸设置面板。



图 21-8　网格划分工具面板中尺寸控制子面板

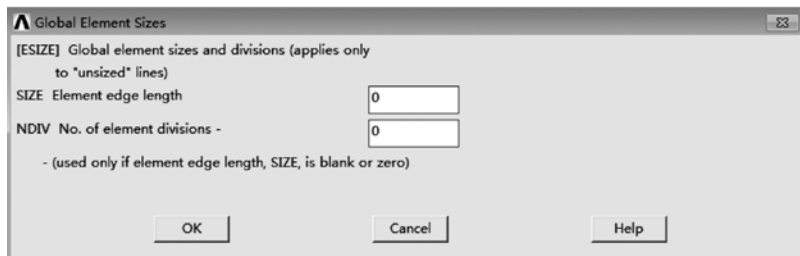


图 21-9 总体网格尺寸设置面板

该设置面板中存在两个控制选项，即单元尺寸控制（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸文本框中输入“0.03”，单击 OK 按钮。

（3）划分流体区域网格

单击网格划分工具面板上的网格划分（Mesh）按钮，弹出拾取对话框，拾取面 A1，单击 OK 按钮。

（4）设置网格属性

单击网格划分工具面板上单元属性（Element Attributes）的设置（Set）按钮，弹出图 21-10 所示的网格属性设置面板，选择单元类型号（Element type number）为 2 PLANE182，材料号为 2，其他保持默认设置，单击 OK 按钮。

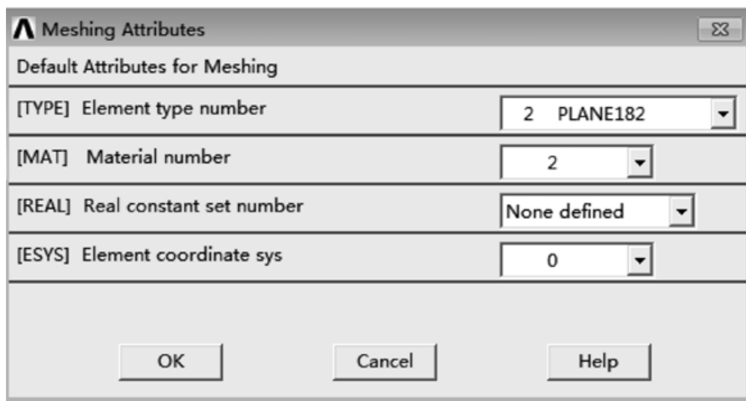


图 21-10 网格属性设置面板

（5）划分固体区域网格

单击网格划分工具面板上的网格划分（Mesh）按钮，弹出拾取对话框，拾取面 A2 和 A3，单击 OK 按钮。

21.2.2 求解基本设置

1．激活大变形分析

GUI：Main Menu | Solution Type | Analysis Type | Sol’ Controls，弹出图 21-11 所示的求解控制设置面板，设置面板中的分析选项（Analysis Options）为大变形（Large Displacement Static），单击 OK 按钮。

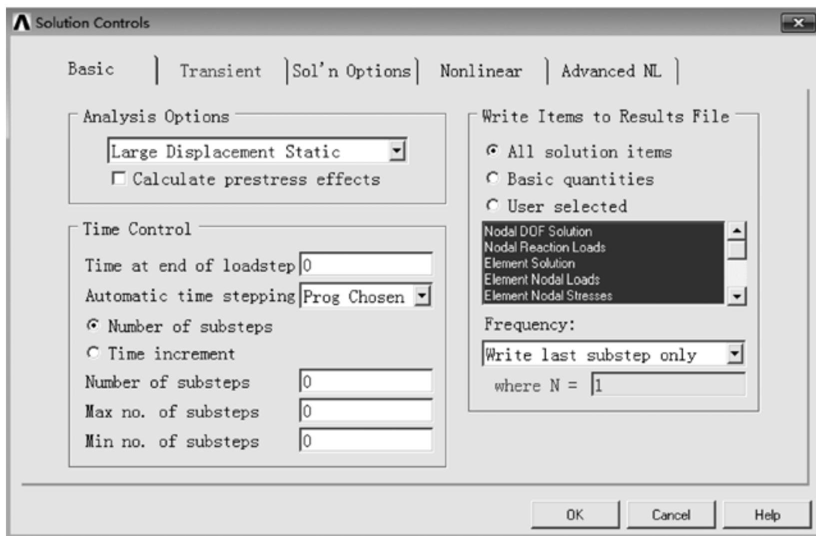


图 21-11　求解控制设置面板

2．设置流场与结构场之间的界面

（1）定义流场界面

GUI：Main Menu｜Solution Type｜Define Loads｜Apply｜Field Surface Intr｜On Lines，弹出图 21-12 所示的定义界面的拾取对话框，在文本框中输入线的编号为“2,3,4,8,9,10”，单击 OK 按钮，弹出图 21-13 所示的在线上定义界面设置面板，设置界面号为 1，单击 OK 按钮。

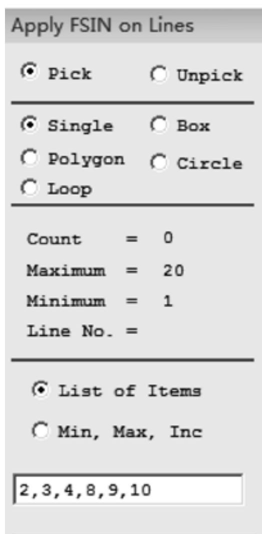


图 21-12　定义界面的拾取对话框

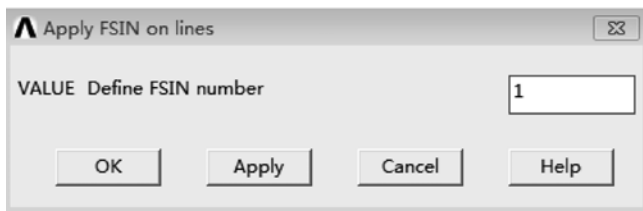


图 21-13　在线上定义界面设置面板

（2）定义结构场界面

GUI：Main Menu｜Solution Type｜Define Loads｜Apply｜Field Surface Intr｜On Lines，弹出图 21-12 所示的定义界面的拾取对话框，在文本框中输入线的编号为“13,14,15,17,

18,19”，单击 OK 按钮，弹出图 21−13 所示的在线上定义界面设置面板，设置界面号为 1，单击 OK 按钮。

3．定义流体边界条件

（1）定义壁面条件

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L11、L20、L7、L1、L16 和 L5，单击 OK 按钮，弹出图 21−14 所示的在线处施加速度设置面板，设置 VX=0、VY=0 和 VZ=0，单击 OK 按钮。

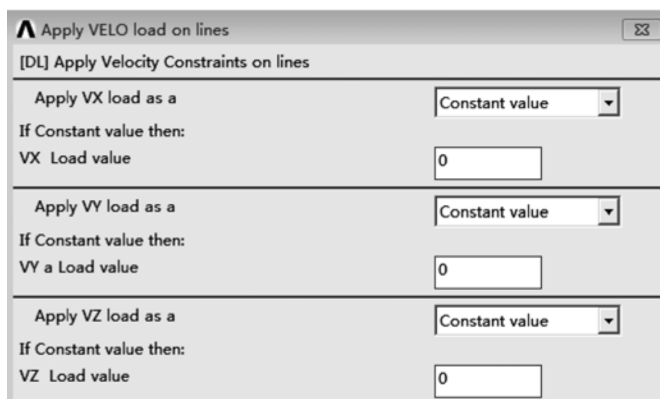


图 21−14 在线处施加速度设置面板

（2）定义入口速度

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L11、L20、L7、L1、L16 和 L5，单击 OK 按钮，弹出图 21−14 所示的在线处施加速度设置面板，设置 VX=1.6、VY=0 和 VZ=0，单击 OK 按钮。

（3）定义出口压力

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Pressure DOF | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L2，单击 OK 按钮，弹出图 21−15 所示的在线上施加压力设置面板，设置压力值为 0，单击 OK 按钮。

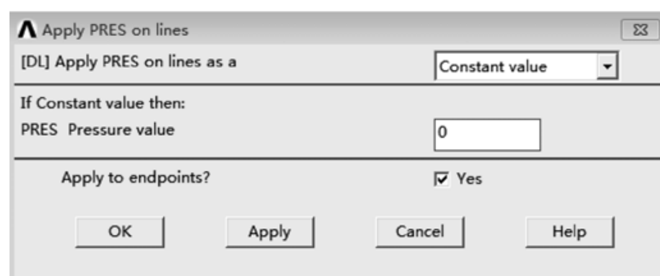


图 21−15 在线上施加压力设置面板

4．定义固体边界条件

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L16 和 L20，弹出图 21−16 所示的在线上施加约束设置面

板，选择约束类型为 UX，单击 Apply 按钮，弹出拾取对话框，拾取线 L16 和 L20，返回图 21−16 所示的在线上施加约束设置面板，选择约束类型为 UY，单击 OK 按钮。

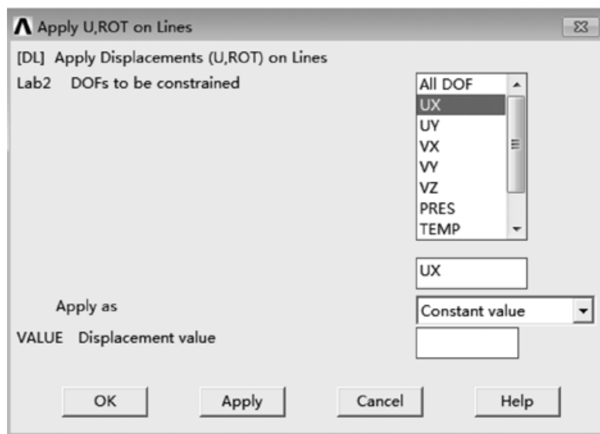


图 21−16 在线上施加约束设置面板

5．设置流体求解选项

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Solution Options，弹出图 21−17 所示的流体求解选项设置面板；设置 TURB 选项为 Turbulent，即流体流动状态为湍流，激活允许网格运动（Allow mesh motion？），其他选项保持默认值，单击 OK 按钮。

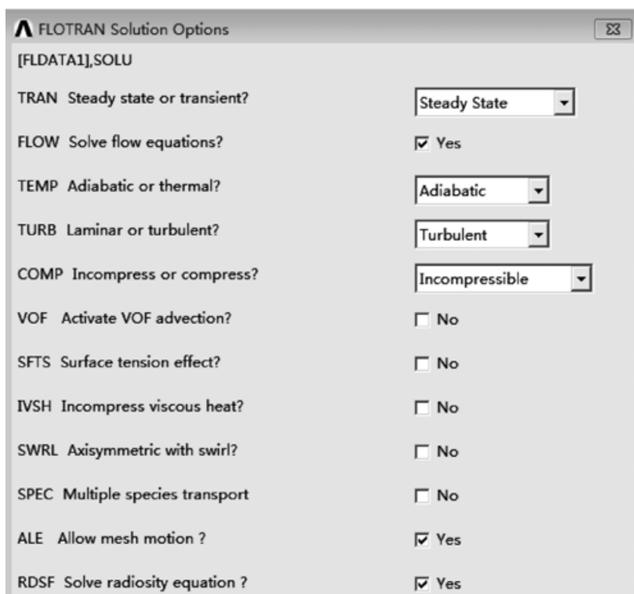


图 21−17 流体求解选项设置面板

6．设置求解算法

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Algorithm Ctrl，弹出图 21−18 所示的算法控制设置面板，选项增强型的 SIMPLEN 算法（SIMPLEN:Enhanced Algorithm），单击

OK 按钮。

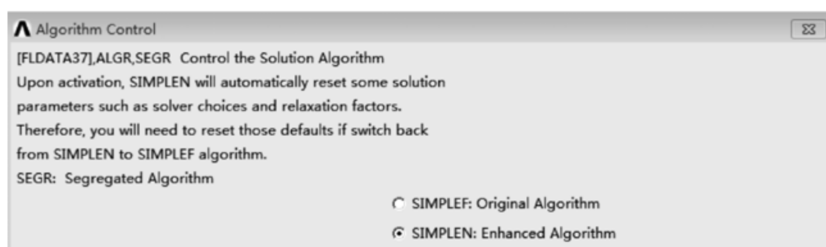

Algorithm Control
[FLDATA37],ALGR,SEGR Control the Solution Algorithm
Upon activation, SIMPLEN will automatically reset some solution
parameters such as solver choices and relaxation factors.
Therefore, you will need to reset those defaults if switch back
from SIMPLEN to SIMPLEF algorithm.
SEGR: Segregated Algorithm
SIMPLEF: Original Algorithm
SIMPLEN: Enhanced Algorithm

图 21-18　算法控制设置面板

7．设置求解控制

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Execution Ctrl，弹出图 21-19 所示的稳态求解控制面板，设置总体迭代次数（Global iterations）为 11，其他保持默认设置，单击 OK 按钮。

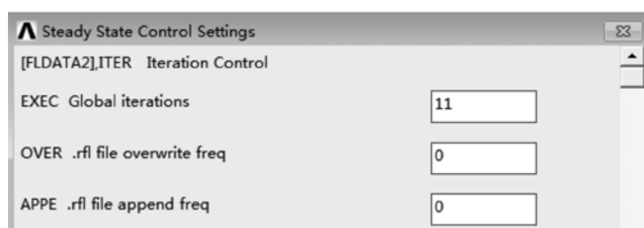

Steady State Control Settings
[FLDATA2],ITER Iteration Control
EXEC Global iterations 11
OVER .rfl file overwrite freq 0
APPE .rfl file append freq 0

图 21-19　稳态求解控制面板

8．设置计算结果输出

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Additional Out | RFL Out Derived，弹出图 21-20 所示的导出量输出控制面板，勾选面板上的所有选项，单击 OK 按钮。

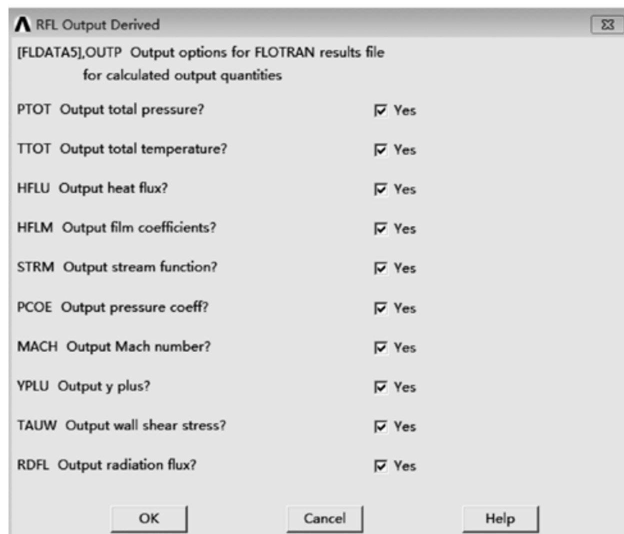

RFL Output Derived
[FLDATA5],OUTP Output options for FLOTRAN results file
for calculated output quantities
PTOT Output total pressure? Yes
TTOT Output total temperature? Yes
HFLU Output heat flux? Yes
HFLM Output film coefficients? Yes
STRM Output stream function? Yes
PCOE Output pressure coeff? Yes
MACH Output Mach number? Yes
YPLU Output y plus? Yes
TAUW Output wall shear stress? Yes
RDFL Output radiation flux? Yes
OK Cancel Help

图 21-20　导出量输出控制面板

9．设置流体属性参数

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Fluid Properties，弹出图 21-21 所示的流体属性参数设置面板，设置密度选项为常数（Constant），设置粘度选项为常数（Constant），单击 OK 按钮，弹出图 21-22 所示的计算流体属性设置面板，设置流体密度为 1000，粘度为 0.00047，单击 OK 按钮。

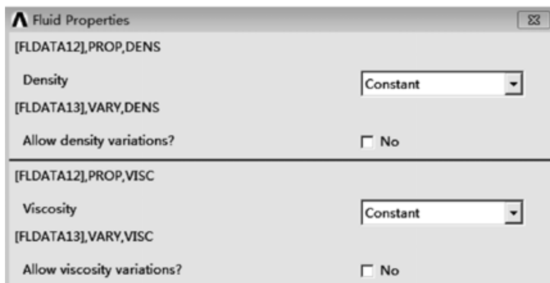


图 21-21　流体属性参数设置面板

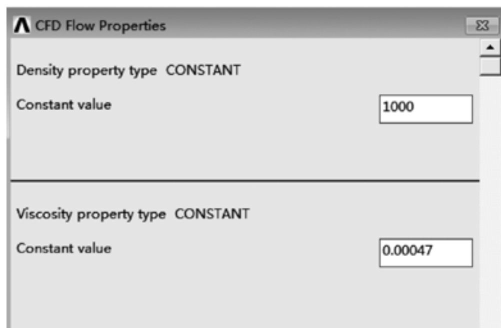


图 21-22　计算流体属性设置面板

10．设置流体松弛/稳定参数

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Relax/Stab/Cap | Stability Parms，弹出图 21-23 所示的流体求解稳定参数设置面板，设置人工阻尼（Artificial viscosity）为 0.2，单击 OK 按钮。

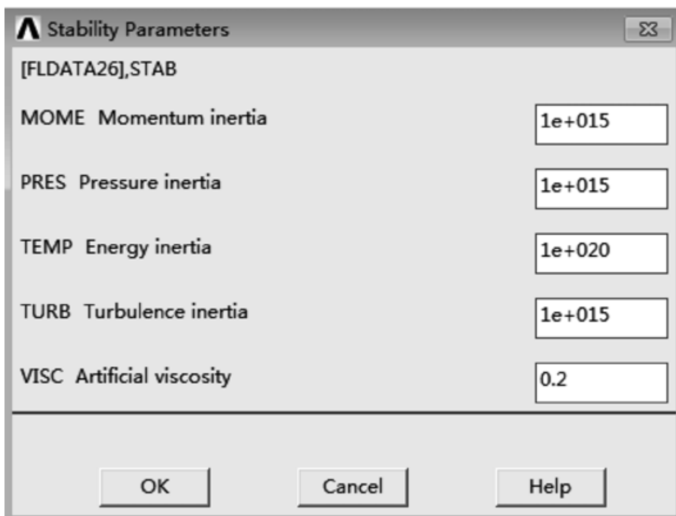


图 21-23　流体求解稳定参数设置面板

11．设置流体湍流模型

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Turbulence | Turbulence Model，弹出图 21-24 所示的流体湍流模型设置面板，选择湍流模型为 RNG，单击 OK 按钮，弹出 RNG 湍流模型相应的计算参数设置面板，保持默认设置，单击 OK 按钮。

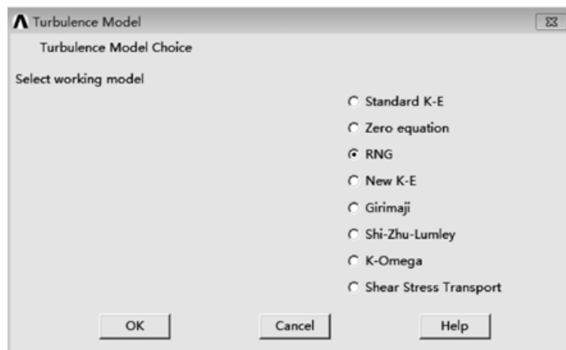


图 21-24 流体湍流模型设置面板

12．设置流体求解器

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | CFD Solver Controls | PRES Solver CFD，弹出图 21-25 所示的流体压力求解器设置面板，选择 PGMR 求解器，单击 OK 按钮。

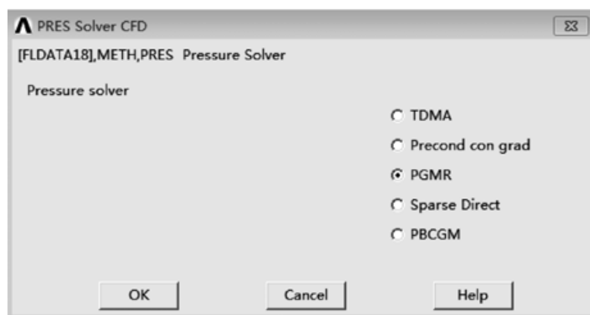


图 21-25 流体压力求解器设置面板

13．设置求解流体对流项算法

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Advection，弹出图 21-26 所示的流体对流项求解算法设置面板，设置可压缩压力方程的算法为 SUPG，单击 OK 按钮。

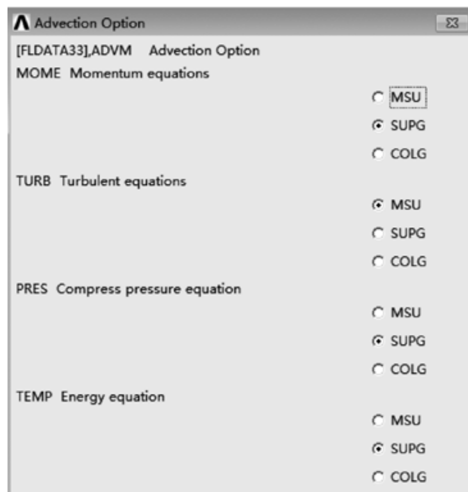


图 21-26 流体对流项求解算法设置面板

21.2.3 多场耦合求解设置

1．激活多场耦合求解器

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up，弹出图 21-27 所示的激活多场求解器设置面板，选择 ON，单击 OK 按钮，弹出图 21-28 所示的设置多场求解方法面板，选择单代码多场求解器（MFS-Single Code），单击 OK 按钮。

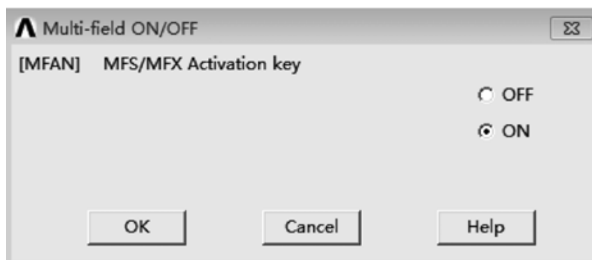


图 21-27　激活多场求解器设置面板



图 21-28　设置多场求解方法面板

2．定义场

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Define | Define，弹出图 21-29 所示的定义场按设置面板，设置场号为 1，选择场单元类型为 FLUID141，设置场名为 FULID，单击 Apply 按钮；继续设置场号为 2，选择场单元类型为 PLANE182，设置场名为 STRUC，单击 OK 按钮。

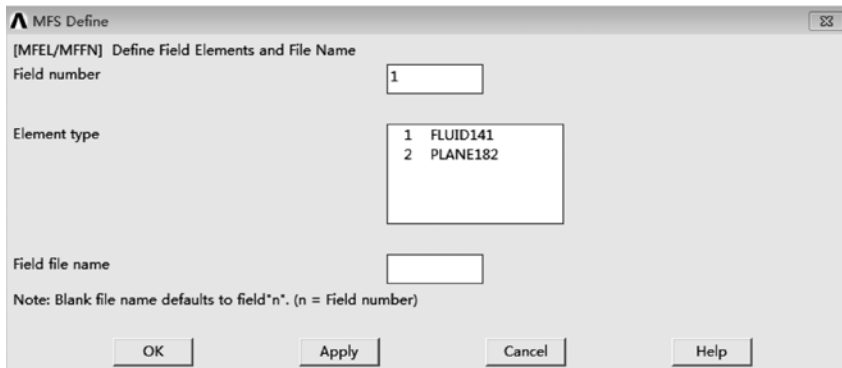


图 21-29　定义场设置面板

3．捕获场

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Capture，弹出图 21-30 所示的多场求解捕获场选项设置面板，选择场号（Filed number）为 1，单击 OK 按钮，按照原操作路径，继续选择场号（Filed number）为 2，单击 OK 按钮。

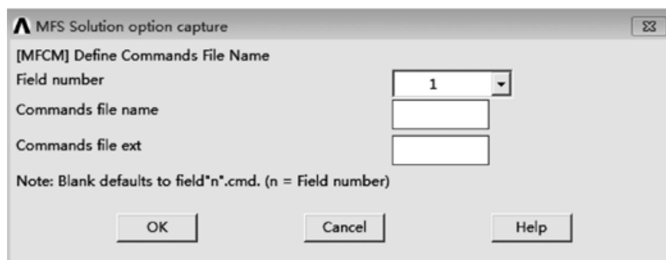


图 21-30　多场求解捕获场选项设置面板

4．设置场求解顺序

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Setup | Order，弹出图 21-31 所示的多场求解顺序设置面板，选择先求解场 1，即先求解流场，然后求解场 2，即最后求解固体场，单击 OK 按钮。

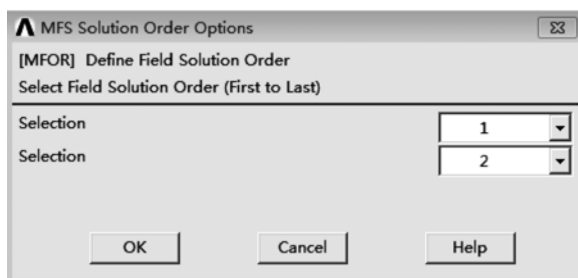


图 21-31　多场求解顺序设置面板

5．设置场界面载荷传递

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Interface | Surface，弹出图 21-32 所示的多场求解界面载荷传递选项，设置传递数据标签为 FORC，求解顺序为从场 1 到场 2，载荷的传递界面为 1，单击 Apply 按钮，继续设置传递数据标签为 DISP，求解顺序从场 1 到场 2，载荷的传递界面为 1，单击 OK 按钮。

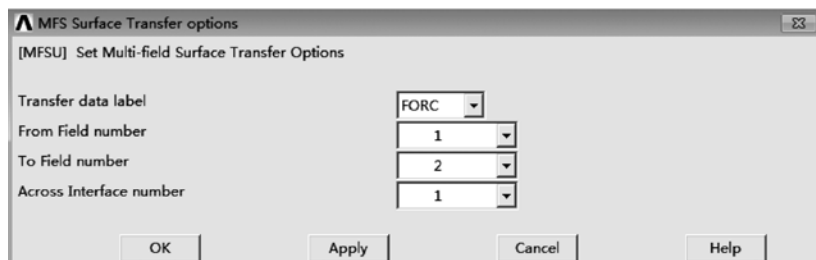


图 21-32　多场求解界面载荷传递选项

6．设置多场求解策略

（1）设置多场求解迭代次数

GUI：Main Menu｜Solution｜Multi-field Set Up｜MFS-Single Code｜Stagger｜Iterations，弹出图 21-33 所示的多场求解迭代设置面板，设置最大迭代次数（Maximum Stagger Iteration）为 6，最小迭代次数（Minimum Stagger Iteration）为 1，目标迭代次数（Target Stagger Iterations）为 6，单击 OK 按钮。

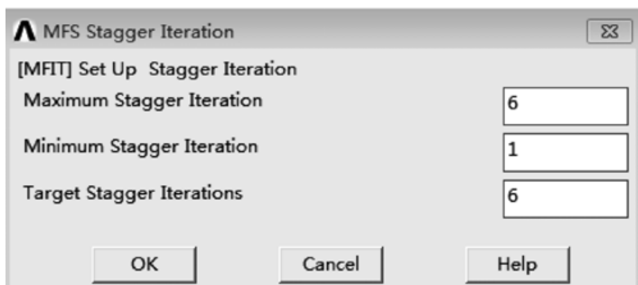


图 21-33　多场求解迭代设置面板

（2）设置多场求解收敛准则

GUI：Main Menu｜Solution｜Multi-field Set Up｜MFS-Single Code｜Stagger｜Interations，弹出图 21-34 所示的多场耦合求解收敛选项设置面板，选择收敛项为 ALL，单击 OK 按钮，弹出图 21-35 所示的设置收敛值面板，设置收敛值为 0.01，单击 OK 按钮。

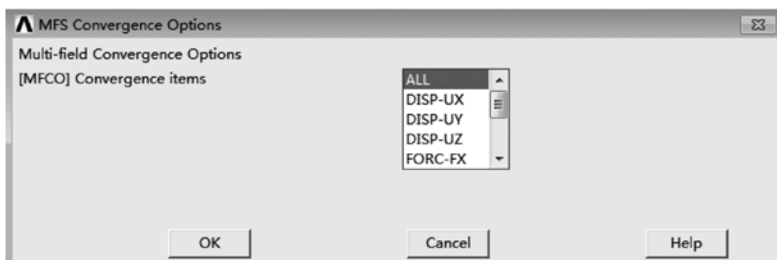


图 21-34　多场耦合求解收敛选项设置面板

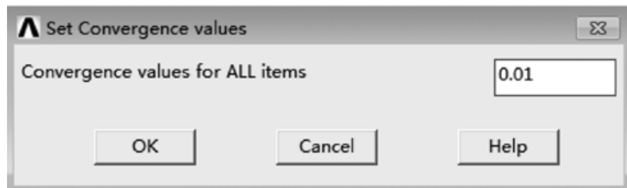


图 21-35　设置收敛值面板

（3）设置多场求解松弛系数

GUI：Main Menu｜Solution｜Multi-field Set Up｜MFS-Single Code｜Stagger｜Relaxation，弹出图 21-36 所示的多场耦合求解松弛系数设置面板，选择收敛项为 ALL，单击 OK 按钮，弹出图 21-37 所示的设置松弛系数面板，设置松弛系数为 0.5，单击 OK 按钮。

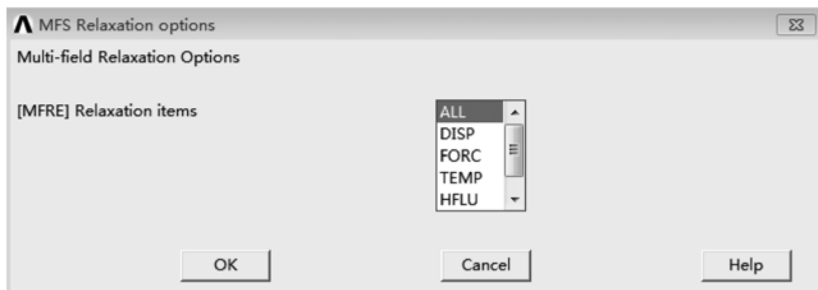


图 21-36　多场耦合求解松弛系数设置面板

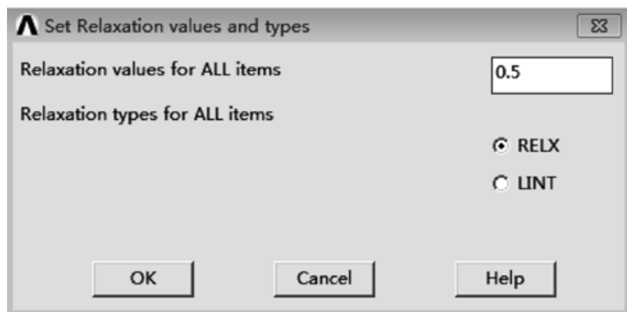


图 21-37　设置松弛系数面板

7．求解

GUI：Main Menu｜Solution｜Solve｜Current LS，开始求解。

21.2.4 后处理

图 21-38～图 21-41 所示为流-固耦合分析中流场中速度、压力、湍流动能和有效粘度云图，图 21-42 和图 21-43 所示为流-固耦合分析中橡胶的位移和等效应力云图，由以上计算结果可知，本章基于多场耦合求解的方法成功实现了双向流-固耦合分析，查看结果的具体方法，用户可参见本章的视频教程。

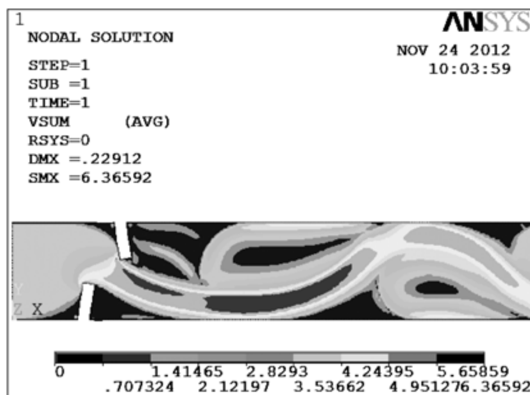


图 21-38　流场的速度云图

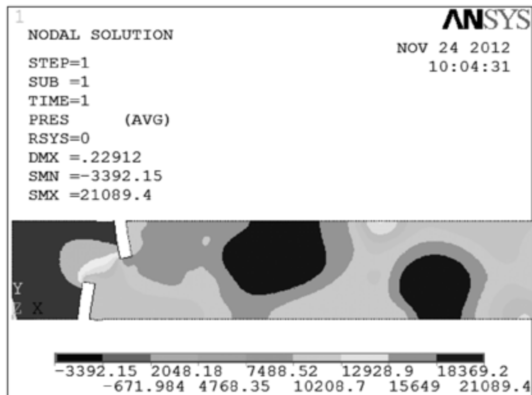


图 21-39　流场的压力云图

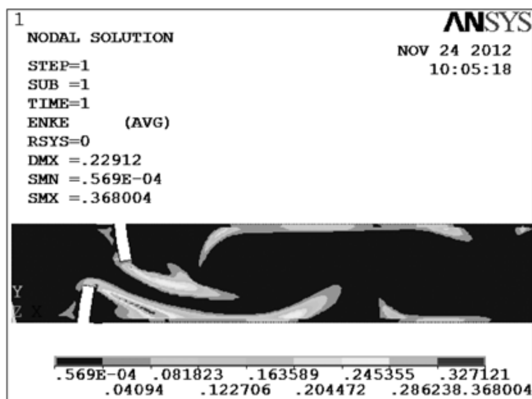


图 21-40　流场的湍流动能云图

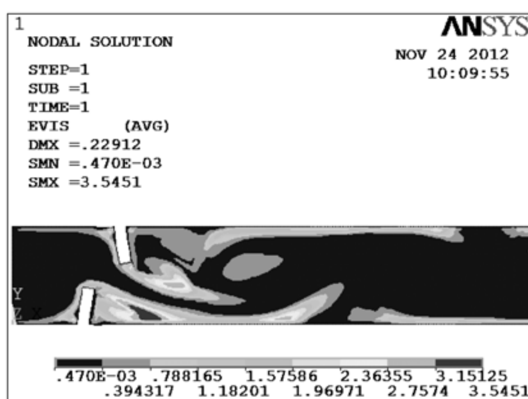


图 21-41　流场的有效粘度云图

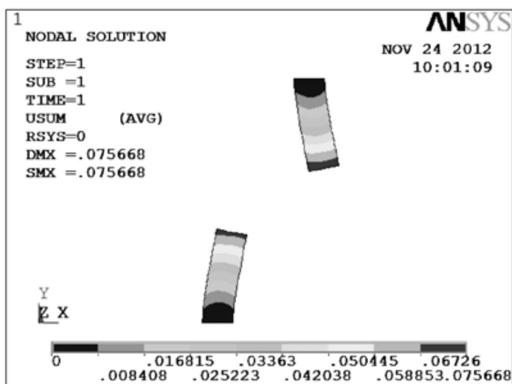


图 21-42　橡胶的位移云图

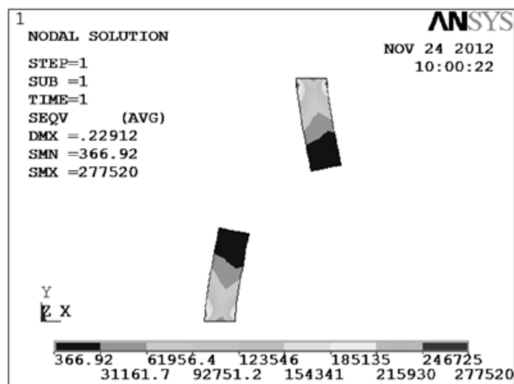


图 21-43　橡胶的等效应力云图

21.3　命令流

```
/FILNAME,Fluid-solid interaction analysis,0
/PREP7
ET,1,141              ！ 定义流体分析单元
ET,2,182,             ！ 定义结构单元
!设置流体单元的关键字，激活结构自由度
KEYOPT,1,4,1
!设置结构单元的关键字
KEYOPT,2,1,2
KEYOPT,2,3,2
KEYOPT,2,6,1
!定义超弹材料模型参数
tb,hyper,2,,2,mooney
tbdata,1,0.29E+6,0.18E+6, 1.4E-7
!建立模型，定义关键字
K,1,0,0,0
```



```
K,2,0.8,0,0
K,3,0.8,0.45,0
K,4,0.95,0.45,0
K,5,0.95,0,0
K,6,7,0,0
K,7,7,1.2,0
K,8,0.8+0.3+0.3,1.2,0
K,9,0.8+0.3+0.3,1.2-0.45,0
K,10,0.8+0.3+0.15,1.2-0.45,0
K,11,0.8+0.3+0.15,1.2,0
K,12,0,1.2,0
K,13,0.8,0.45,0
K,14,0.95,0.45,0
K,15,0.8+0.3+0.3,1.2-0.45,0
K,16,0.8+0.3+0.15,1.2-0.45,0
!通过关键点建立面
A,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12
A,2,13,14,5
A,8,15,16,11
!划分流体区域网格
TYPE,1
ESIZE,0.03
AMESH,1
!划分固体区域网格
TYPE,2
ESIZE,0.03
MAT,2
AMESH,2
AMESH,3
!进入求解
/SOL
NLGEOM,1 !激活结构的大变形分析
!设置流-固界面载荷传递面
SFL,2,FSIN,1,
SFL,3,FSIN,1,
SFL,4,FSIN,1,
SFL,10,FSIN,1,
SFL,9,FSIN,1,
SFL,8,FSIN,1,
SFL,13,FSIN,1,
SFL,14,FSIN,1,
SFL,15,FSIN,1,
SFL,17,FSIN,1,
SFL,18,FSIN,1,
SFL,19,FSIN,1,
!定义边界条件
```

```
DL,16, ,UX,
DL,16, ,UY,
DL,20, ,UX,
DL,20, ,UY,
DL,11, ,VX,0,1
DL,11, ,VY,0,1
DL,11, ,VZ,0,1
DL,20, ,VX,0,1
DL,20, ,VY,0,1
DL,20, ,VZ,0,1
DL,7, ,VX,0,1
DL,7, ,VY,0,1
DL,7, ,VZ,0,1
DL,1, ,VX,0,1
DL,1, ,VY,0,1
DL,1, ,VZ,0,1
DL,16, ,VX,0,1
DL,16, ,VY,0,1
DL,16, ,VZ,0,1
DL,5, ,VX,0,1
DL,5, ,VY,0,1
DL,5, ,VZ,0,1
DL,12, ,VX,1.6,1
DL,12, ,VY,0,1
DL,12, ,VZ,0,1
DL,6, ,PRES,0,1
!设置流体求解选项
FLDATA1,SOLU,FLOW,1
FLDATA1,SOLU,TURB,1
FLDATA1,SOLU,ALE,1
FLDATA1,SOLU,RDSF,1
!设置流体求解算法
FLDATA,ALGR,SEGR,SIMPLEN
!设置求解控制
FLDATA2,ITER,EXEC,11,
!设置计算结果输出
FLDATA5,OUTP,PTOT,1
FLDATA5,OUTP,TTOT,1
FLDATA5,OUTP,HFLU,1
FLDATA5,OUTP,HFLM,1
FLDATA5,OUTP,STRM,1
FLDATA5,OUTP,PCOE,1
FLDATA5,OUTP,MACH,1
FLDATA5,OUTP,YPLU,1
FLDATA5,OUTP,TAUW,1
FLDATA5,OUTP,RDFL,1
```

```
!设置流体属性参数
FLDATA8,NOMI,DENS,1000,
FLDATA8,NOMI,VISC,4.7E-4,
!设置流体松弛/稳定性参数
FLDATA26,STAB,VISC,0.2,
FLDATA24,TURB,MODL,3!选择流体计算使用的湍流模型
FLDATA18,METH,PRES,4 !选择流体压力方程求解器
!设置流体求解对流项算法
FLDATA,ADVM,PRES,SUPG
!进入多场耦合求解器
MFAN,ON,MFSC !激活单代码耦合场求解器
!定义场
MFEL,1,1, , , , , , , ,
MFFN,1,FULID
MFEL,2,2, , , , , , , ,
MFFN,2,STRUC
!捕获场
MFCM,        1, ,
MFCM,        2, ,
!设置场的求解顺序
MFOR,        1,        2
!设置场界面载荷传递
MFSU,        1,        1,FORC,        2
MFSU,        1,        2,DISP,        1
!设置多场求解策略
MFIT,6,1,6,
MFCO,ALL,0.01,
MFRE,ALL,0.5,RELX
!开始求解
SOLVE
```



第 22 章　振动金属板与水的双向瞬态流-固耦合分析

22.1　问题的描述

22.1.1 几何模型

图 22-1 所示为双向流-固耦合分析模型，整个流场区域的长度为 5m，高度为 1.5m，钢板的高度为 0.6m，宽度为 0.1m。

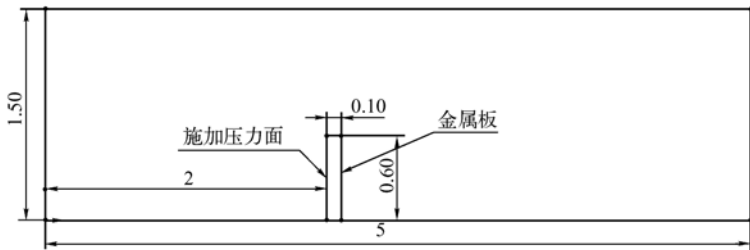


图 22-1　双向流-固耦合分析模型

22.1.2 材料参数

因为该实例需要计算流体流动中的能量方程，因此需要输入流体的密度和粘度。本实例取水的密度为 $1000kg/m^3$，粘度为 0.00015kg/（m/s）。此外，金属板的弹性模量为 3.5×10^7Pa，泊松比为 0.35，密度为 $3000kg/m^3$。

22.1.3 选择单元

本实例选用三维流体单元 FLUID141 单元模拟流体，使用 PLANE182 单元模拟钢板。

22.1.4 流体流动模型

该实例假设流体的流动状态为湍流，并且使用 k-ω湍流模型。

22.1.5 边界条件及载荷

流体的区域的两侧的压力为 0，流体区域底边的壁面条件为无滑移边界条件，流体区域顶边的法向速度为 0，固定约束流体区域两侧、流体区域底边和金属板的底边。此外，在金属板的一侧施加图 22-2 所示的随时间变化的压力载荷，其变化规律为

$$p = \left|3.3\times10^{4}\sin(360t)\right| \qquad (22\text{-}1)$$

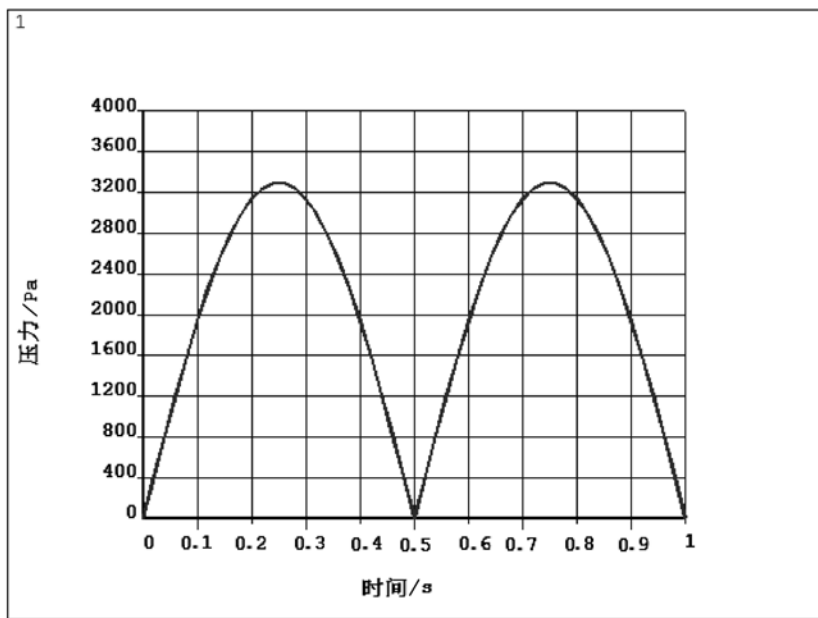


图 22-2　施加在钢板上的压力与时间的关系

22.2　GUI 操作

22.2.1 前处理

1．定义文件名

GUI：Utility Menu｜File｜Change Jobname，弹出一个对话框，在文本框中输入“Transient fluid-solid interaction”，单击 OK 按钮。

2．选择单元

（1）定义单元

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Element Type｜Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击 Add 按钮，弹出图 22-3 所示的选择单元对话框，选择左侧中的 FLOTRAN CFD 项，然后在右边选择 2D FLOTRAN 141 项，单击 Apply 按钮，继续选择左侧中的 Structural Solid 项，然后在右边选择 Quad 4 node 182 项，单击 OK 按钮。

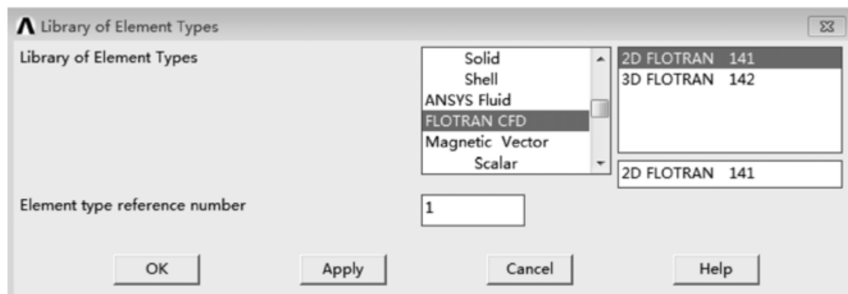


图 22-3　选择单元对话框

（2）设置单元关键字

在单元类型对话框中选择 FLUID141 项，然后单击 Options 按钮，弹出图 22-4 所示的 FULID141 单元关键字设置面板，将支持网格位移自由度选项（Support mesh disp. DOFS）设置为 Yes，单击 OK 按钮，返回单元类型界面，继续在单元类型对话框中选择 PLANE182 项，然后单击 Options 按钮，弹出图 22-5 所示的 PLANE182 单元关键字设置面板，设置单元技术（Element technology）为简化增强应变选项（Simple Enhanced Strn），单元行为（Element behavior）为平面应变（Plane strain），单元公式（Element formulation）为位移/力混合（Mixed U/P），单击 OK 按钮，返回单元类型界面，单击 Close 按钮。

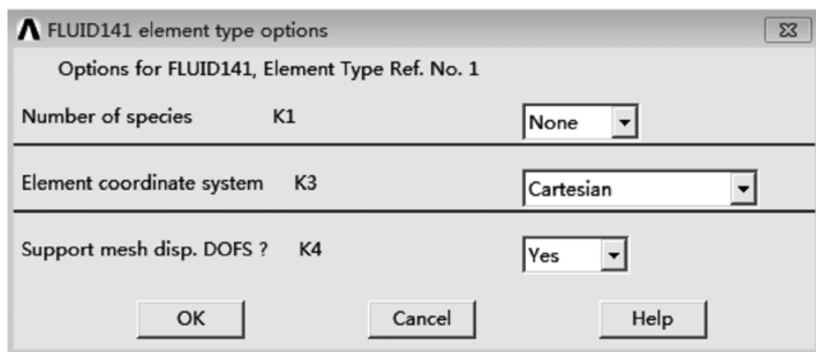


图 22-4　FULID141 单元关键字设置面板

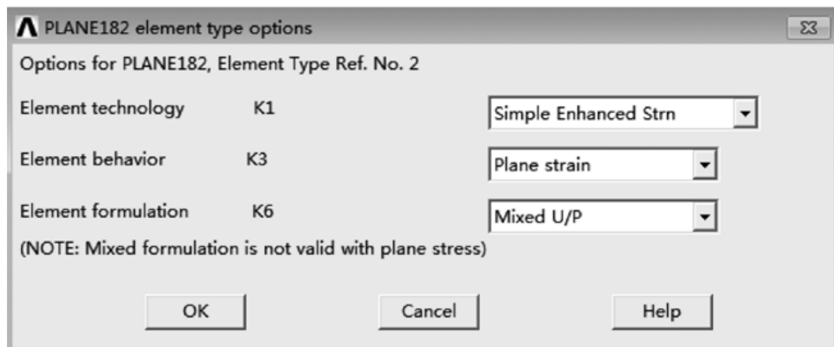


图 22-5　PLANE182 单元关键字设置面板

3．定义材料模型

GUI：Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models，弹出一个对话框，选择菜单命令 Material | New Modle，在弹出的对话框中输入材料号为 2，选择菜单命令 Structural | Elastic | Isotropic，弹出图 22-6 所示的线弹性材料参数设置面板，设置弹性模量 EX=3.5×10^7，泊松比 PRXY=0.35，单击 OK 按钮，关闭对话框，继续选择菜单命令 Structural | Elastic | Density，弹出图 22-7 所示的材料密度设置面板，输入密度 DENS=3000，单击 OK 按钮，关闭对话框，选择菜单命令 Material | Exit，退出定义材料模型行为的面板。

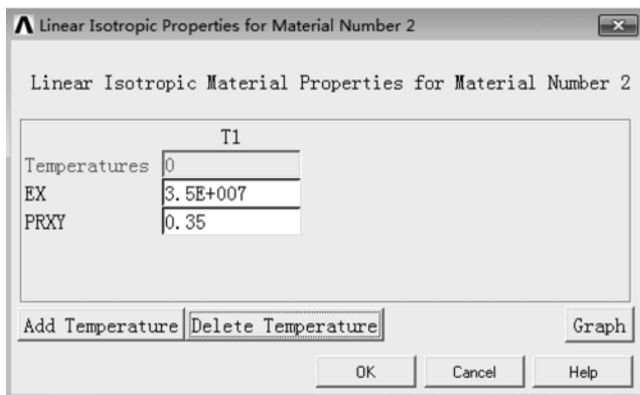


图 22-6 线弹性材料参数设置面板

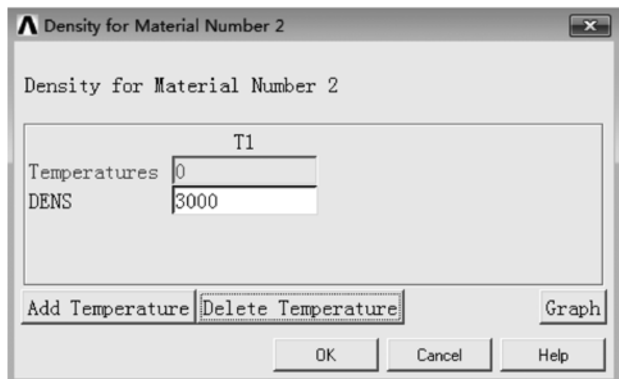


图 22-7 材料密度设置面板

4．建立模型

（1）定义关键点

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS，弹出图 22-8 所示的在激活坐标系中定义关键点面板，在面板中关键点号（Keypoint number）文本框中输入“1”，在激活的坐标系中设置 X=0、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 2，X=2、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 3，X=2、Y=0.6、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 4，X=2.1、Y=0.6、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 5，X=2.1、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关

键点号为 6，X=5、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 7，X=5、Y=1.5、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 8，X=0、Y=1.5、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 9，X=2、Y=0.6、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 10，X=2.1、Y=0.6、Z=0，单击 OK 按钮。

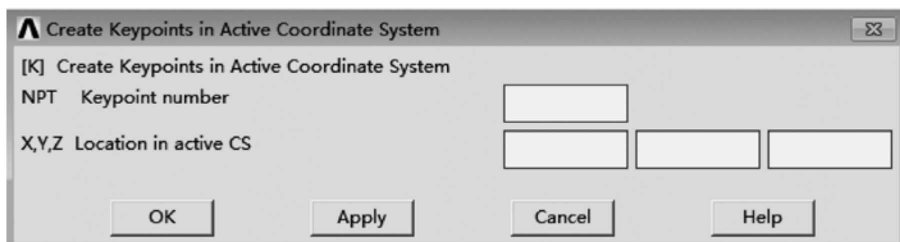


图 22-8　定义关键点面板

（2）定义面

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | Through KPs，弹出图 22-9 所示的拾取对话框，在文本框中输入关键点编号为“1,2,3,4,5,6,7,8”，单击 Apply 按钮，继续在拾取对话框的文本框中输入关键点编号为“2,9,10,5”，单击 OK 按钮。

5．网格划分

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool

（2）设置总体网格尺寸

选择图 22-10 所示的网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设置（Set）按钮，弹出图 22-11 所示的总体网格尺寸设置面板。

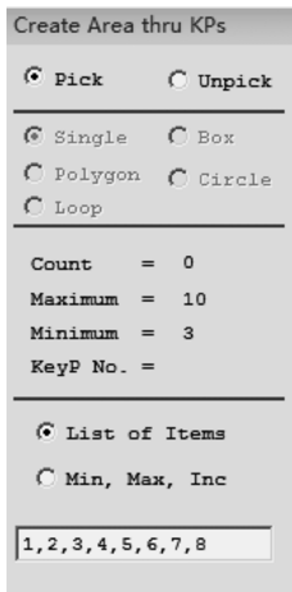


图 22-9　拾取对话框

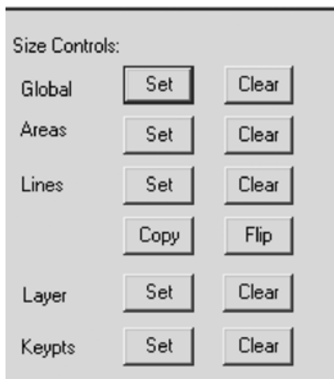


图 22-10　网格划分工具面板中尺寸控制子面板

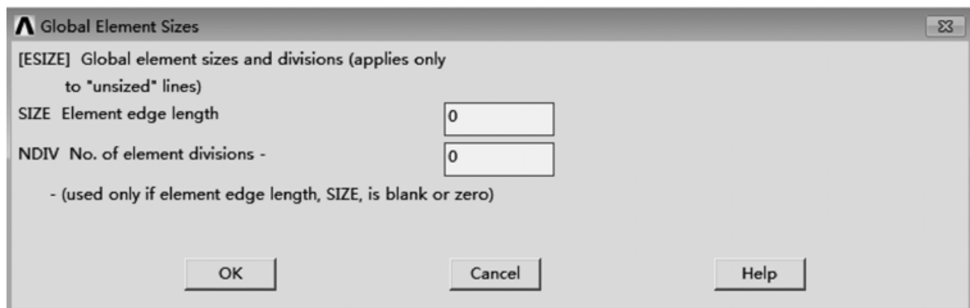


图 22-11 总体网格尺寸设置面板

该设置面板中存在两个控制选项，即单元尺寸控制（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸文本框中输入 0.02，单击 OK 按钮。

（3）划分流体区域网格

选择网格划分工具面板上的网格划分（Mesh）按钮，弹出拾取对话框，拾取面 A1，单击 OK 按钮。

（4）设置网格属性

单击网格划分工具面板上单元属性（Element Attributes）的设置（Set）按钮，弹出图 22-12 所示的网格属性设置面板，选择单元类型号（Element type number）为 2 PLANE182，材料号为 2，其他保持默认设置，单击 OK 按钮。

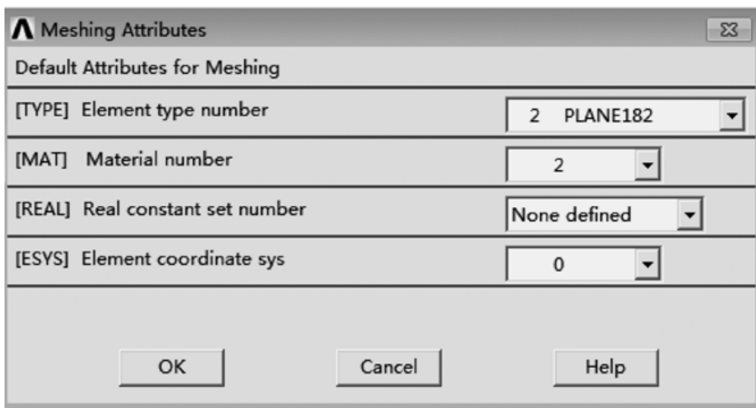


图 22-12 网格属性设置面板

（5）划分固体区域网格

单击网格划分工具面板上的网格划分（Mesh）按钮，弹出拾取对话框，拾取面 A2，单击 OK 按钮。

22.2.2 求解基本设置

1．激活大变形分析

GUI：Main Menu | Solution Type | Analysis Type | Sol’ Controls，弹出图 22-13 所示的求解控制设置面板，设置面板中的分析选项（Analysis Options）为大变形（Large Displacement

Static），单击 OK 按钮。

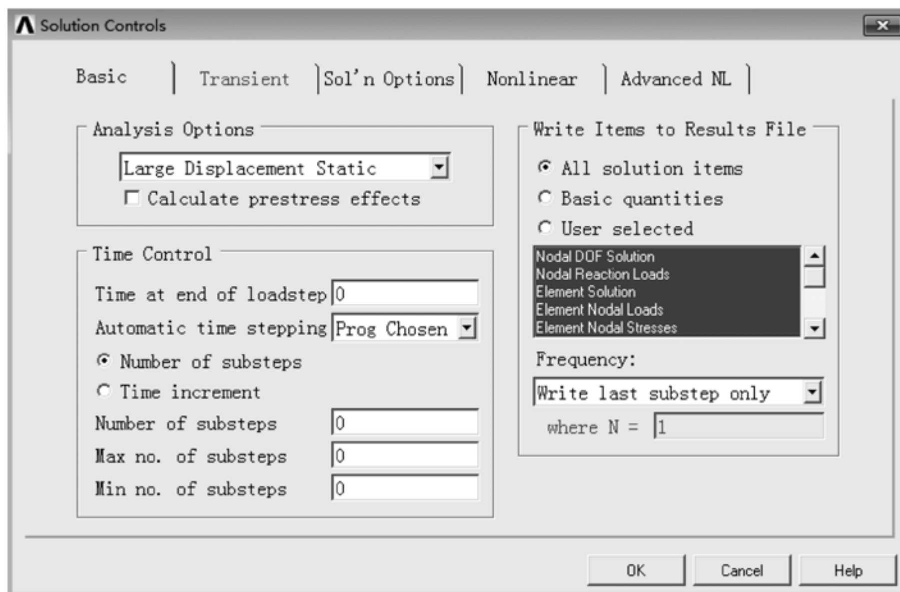


图 22-13 求解控制设置面板

2．设置流场与结构场之间的界面

（1）定义流场界面

GUI：Main Menu | Solution Type | Define Loads | Apply | Field Surface Intr | On Lines，弹出图 22-14 所示的定义界面的拾取对话框，在文本框中输入线的编号为“2,3,4”，单击 OK 按钮，弹出图 22-15 所示的在线上定义界面设置面板，设置界面号为 1，单击 OK 按钮。

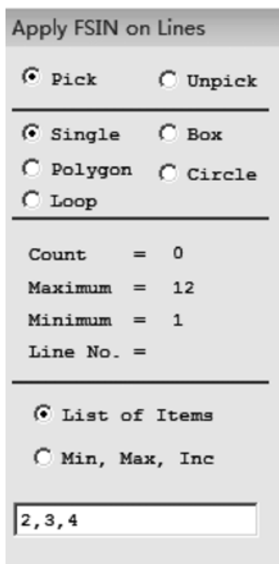


图 22-14 定义界面的拾取对话框

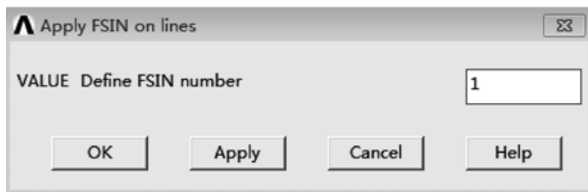


图 22-15 在线上定义界面设置面板

（2）定义结构场界面

GUI：Main Menu | Solution Type | Define Loads | Apply | Field Surface Intr | On Lines，弹出图 22-14 所示的定义界面的拾取对话框，在文本框中输入线的编号为“9,10,11”，单击 OK 按钮，弹出图 22-15 所示的在线上定义界面设置面板，设置界面号为 1，单击 OK 按钮。

3．定义流体边界条件

（1）定义入口压力

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Pressure DOF | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L8，单击 OK 按钮，弹出图 22-16 所示的在线上施加压力设置面板，设置压力值为 0，单击 OK 按钮。

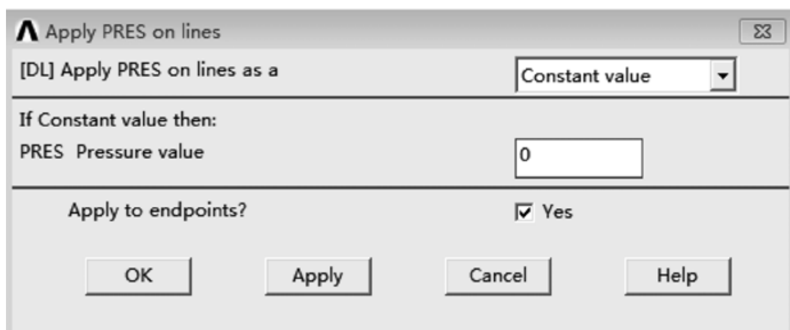


图 22-16 在线上施加压力设置面板

（2）定义入口位移约束

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L8，单击 OK 按钮，弹出图 22-17 所示的在线上施加约束设置面板，选择约束类型为 UX，单击 Apply 按钮，弹出拾取对话框，拾取线 L8，单击 OK 按钮，弹出图 22-17 所示的在线上施加约束设置面板，选择约束类型为 UY，单击 OK 按钮。

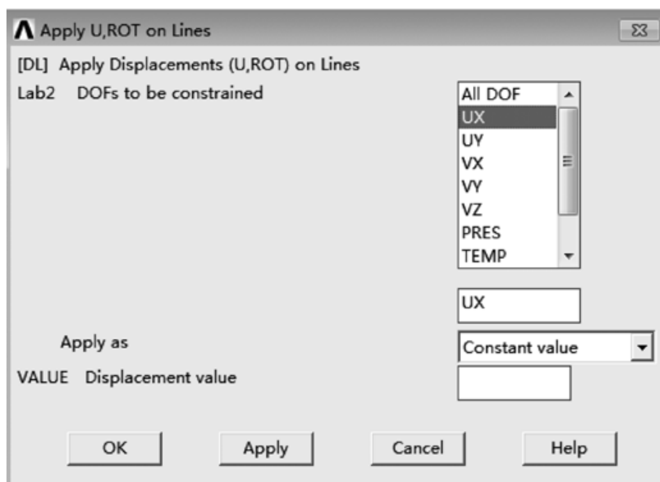


图 22-17 在线上施加约束设置面板

（3）定义出口压力

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Pressure DOF | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L6，单击 OK 按钮，弹出图 22-16 所示的在线上施加压力设置面板，设置压力值为 0，单击 OK 按钮。

（4）定义出口位移约束

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L6，弹出图 22-17 所示的在线上施加约束设置面板，选择约束类型为 UX，单击 Apply 按钮，弹出拾取对话框，拾取线 L6，单击 OK 按钮，弹出图 22-17 所示的在线上施加约束设置面板，选择约束类型为 UY，单击 OK 按钮。

（5）定义流场底边无滑移壁面

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L1 和 L5，单击 OK 按钮，弹出图 22-18 所示的在线处施加速度设置面板，设置 VX=0、VY=0 和 VZ=0，单击 OK 按钮。

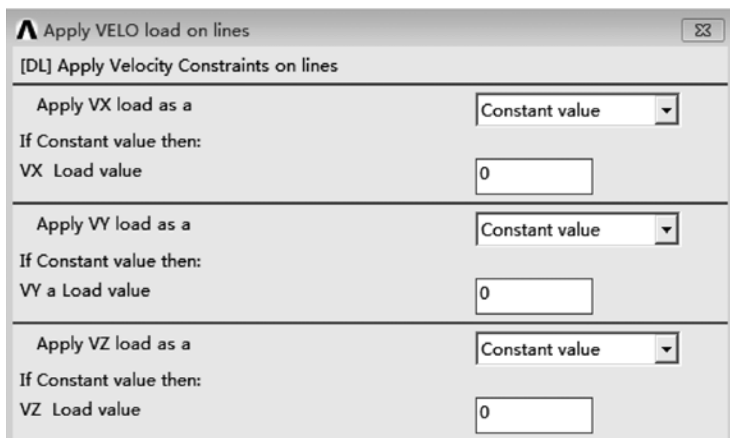


图 22-18 在线处施加速度设置面板

（6）定义流场底边位移约束

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L1 和 L5，弹出图 22-17 所示的在线上施加约束设置面板，选择约束类型为 UX，单击 Apply 按钮，弹出拾取对话框，拾取线 L1 和 L5，单击 OK 按钮，弹出图 22-17 所示的在线上施加约束设置面板，选择约束类型为 UY，单击 OK 按钮。

（7）定义流场顶边的流速

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L7，单击 OK 按钮，弹出图 22-18 所示的在线处施加速度设置面板，设置 VY=0 和 VZ=0，单击 OK 按钮。

4．定义固体边界条件

（1）定义金属板底边的位移约束

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L12，单击 OK 按钮，弹出图 22-17 所示的在线上施加约束

设置面板，选择约束类型为 UX，单击 Apply 按钮，弹出拾取对话框，拾取线 L12，单击 OK 按钮，弹出图 22-17 所示的在线上施加约束设置面板，选择约束类型为 UY，单击 OK 按钮。

（2）定义金属板侧边的压力

1）定义函数。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Functions | Define/Edit，弹出图 22-19 所示的函数编辑器面板，按照图 22-19 输入函数表达式。

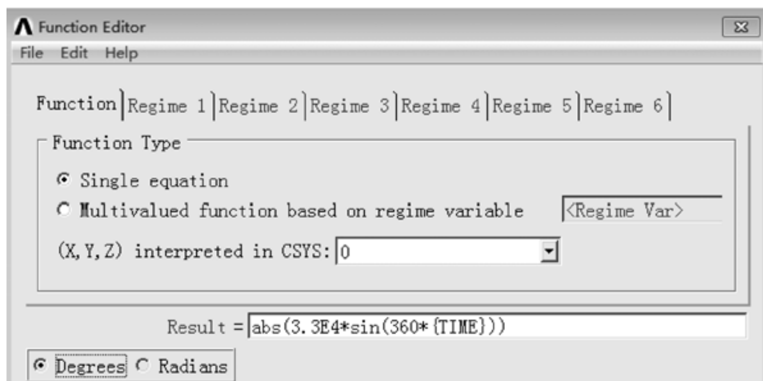


图 22-19 函数编辑器面板

2）保存函数。

选择函数编辑器面板上的菜单命令 File | Save，弹出保存文件的面板，设置保存的文件名为 P，单击保存文件 P.func。

3）读入函数。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Functions | Read File，弹出打开文件界面，选择刚保存的文件 P.func，进行打开操作，弹出图 22-20 所示的函数加载器设置面板，设置表格参数名（Table parameter name）为 P，单击 OK 按钮。

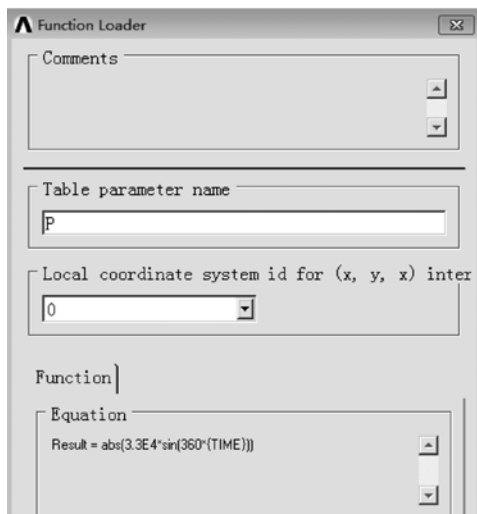


图 22-20 函数加载器设置面板

4）定义金属板侧边的压力。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Pressure | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L9，单击 OK 按钮，弹出图 22-21 所示的在线处施加压力的设置面板，选择压力的载荷形式为存在的表格（Existing table），单击 OK 按钮，选择存在的表格为 P，单击 OK 按钮。

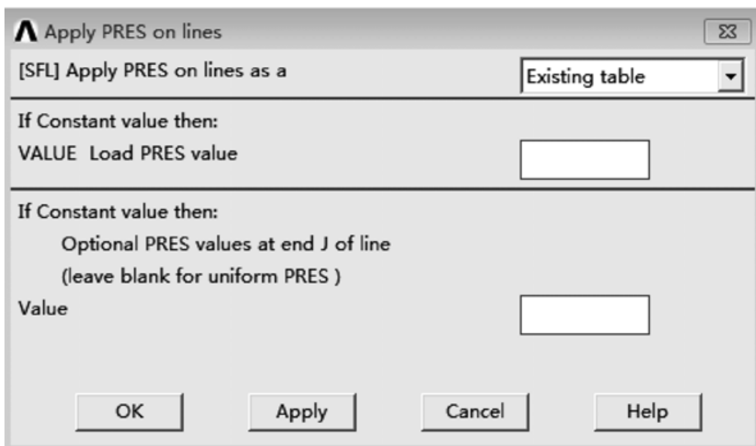


图 22-21 在线处施加压力的设置面板

5．设置非线性求解选项

GUI：Main Menu | Solution Type | Analysis Type | Sol' Controls，弹出求解控制设置面板，选择面板中的非线性选项（Nonlinear），弹出图 22-22 所示的非线性设置面板，设置面板中的线性搜索（Line search）为激活（On），自由度预测器选项（DOF solution predictor）为对所有子步都打开（On for all substp），单击 OK 按钮。

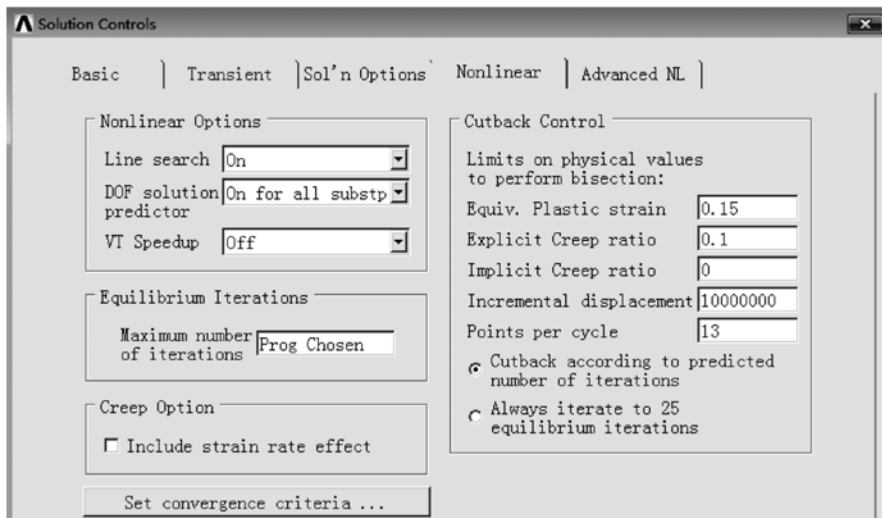


图 22-22 非线性设置面板

6．设置流体求解选项

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Solution Options，弹出图 22-23 所示的流体求解选项设置面板；设置 TRAN 选项为 Transiet，即激活瞬态流体分析；设置 TURB 为 Turbulent，即流体流动状态为湍流，激活允许网格运动（Allow mesh motion？），其他选项保持默认值，单击 OK 按钮。

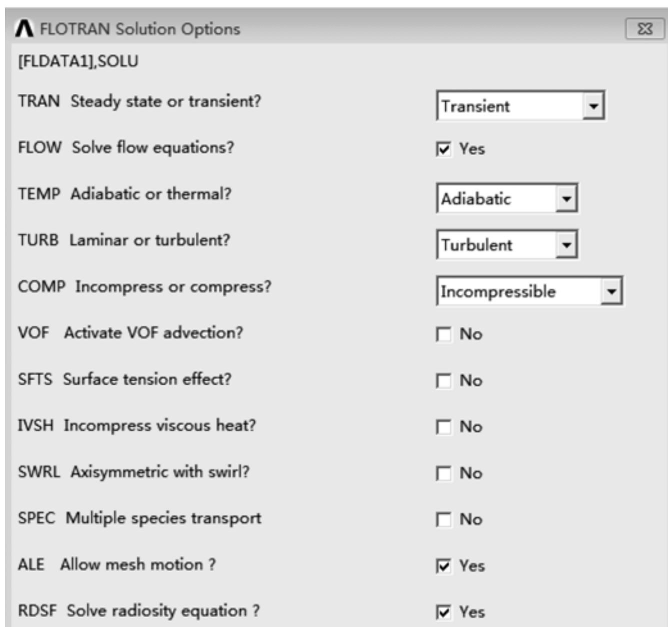


图 22-23 流体求解选项设置面板

7．设置求解算法

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Algorithm Ctrl，弹出图 22-24 所示的算法控制设置面板，选择增强型的 SIMPLEN 算法（SIMPLEN:Enhanced Algorithm），单击 OK 按钮。

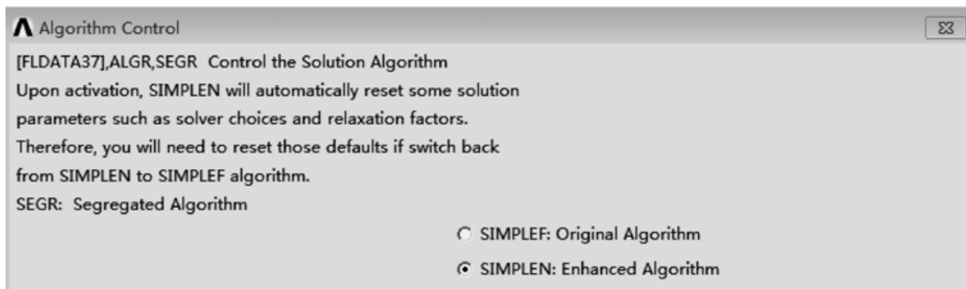


图 22-24 算法控制设置面板

8．设置求解控制

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Execution Ctrl，弹出图 22-25 所示的时间步控制设置面板，设置时间步控制方式为用户定义（User defined），设置输出控制方式

为时间步（Time Steps），单击 OK 按钮。

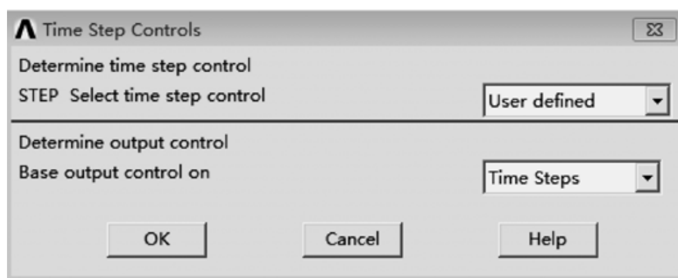


图 22-25　时间步控制设置面板

弹出图 22-26～图 22-28 所示的瞬态求解中的求解时间、迭代和结果输出设置面板，设置用户定义时间步（User-defined time step）为 0.05，时间步数（Number of time steps）为 20，求解终止时间（Stop time）为 1s，设置每个时间点的总体迭代次数（Global iter per time step）为 20，设置计算结果每隔 0.05s 输出一次（Append frequency to results file），单击 OK 按钮。

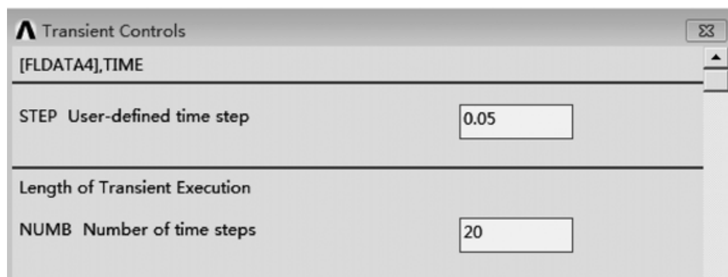


图 22-26　瞬态控制中求解时间设置面板

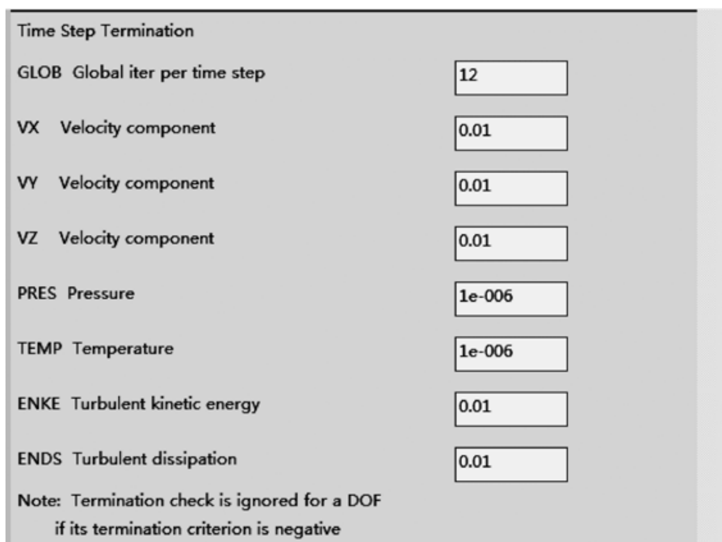


图 22-27　瞬态控制中迭代设置面板

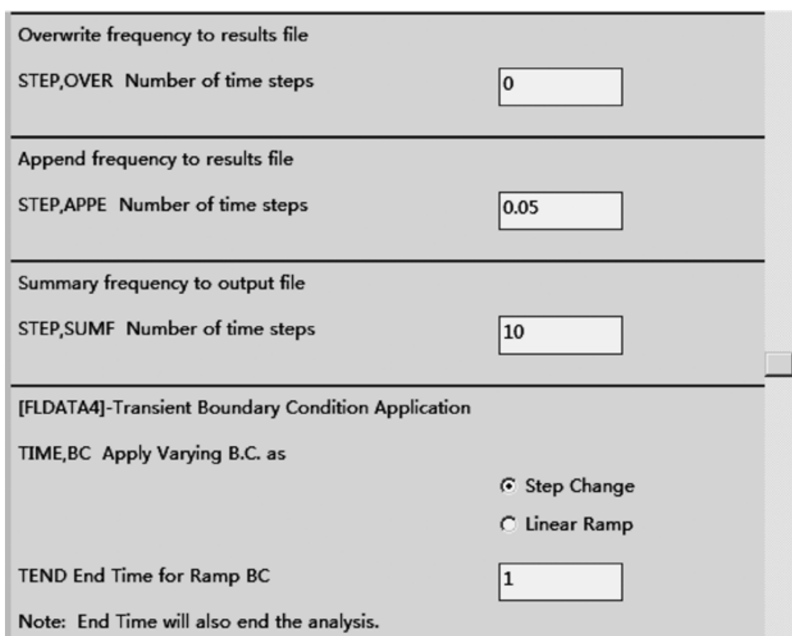


图 22-28 瞬态控制中结果输出设置面板

9．设置流体属性参数

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Fluid Properties，弹出图 22-29 所示的流体属性参数设置面板，设置密度选项为常数（Constant），设置粘度选项为常数（Constant），单击 OK 按钮，弹出图 22-30 所示的计算流体属性设置面板，设置流体密度为 1000，粘度为 0.00002，单击 OK 按钮。

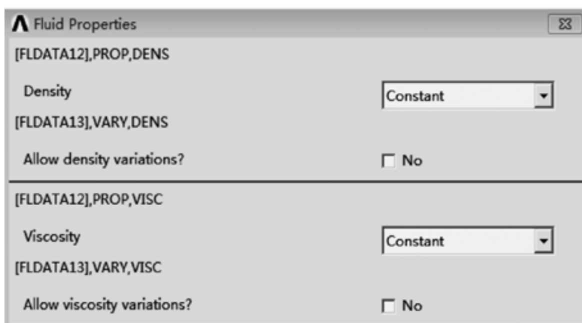


图 22-29 流体属性参数设置面板

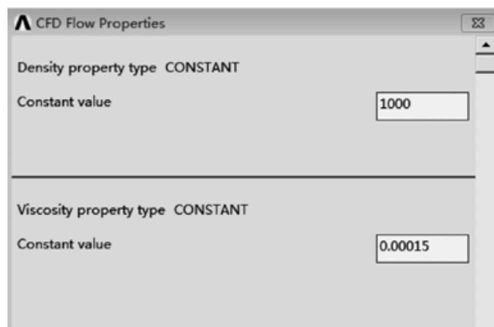


图 22-30 计算流体属性设置面板

10．设置流体环境

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Flow Enviroement | Gravity，弹出图 22-31 所示的流体重力设置面板，因为考虑流体竖直向下的重力，因此设置 *Y* 方向加速度为 9.8，单击 OK 按钮。

11．设置流体求解稳定参数

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Relax/Stab/Cap | Stability Parms，弹出

图 22-32 所示的流体求解稳定参数设置面板，设置人工阻尼（Artificial viscosity）为 0.25，单击 OK 按钮。

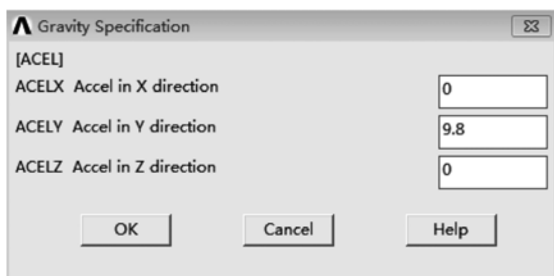


图 22-31 流体重力设置面板

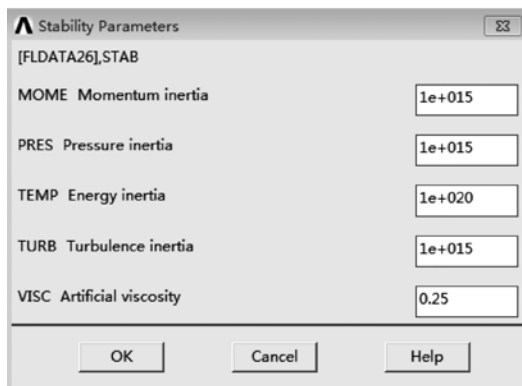


图 22-32 流体求解稳定参数设置面板

12．设置求解器

（1）设置压力方程求解器

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | CFD Solver Controls | PRES Solver CFD，弹出图 22-33 所示的压力方程求解器设置面板，选择求解方法为 TDMA，单击 OK 按钮，弹出图 22-34 所示的 TDMA 方法迭代次数设置面板，设置迭代次数为 150，单击 OK 按钮。

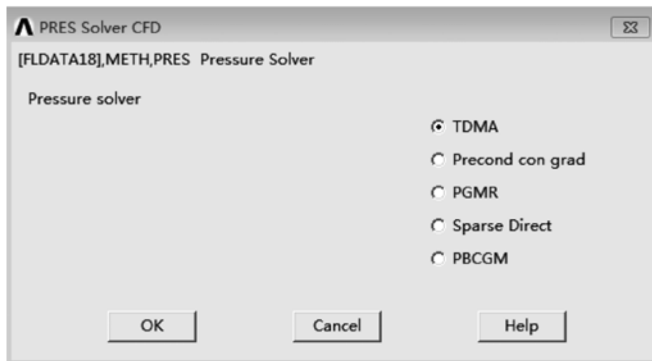


图 22-33 压力方程求解器设置面板

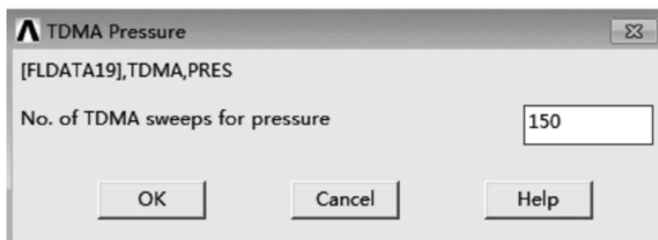


图 22-34 TDMA 方法迭代次数设置面板

（2）设置湍流动能求解器

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | CFD Solver Controls | ENKE Solver CFD，弹出湍流动能方程求解器设置面板，选择求解方法为 TDMA，单击 OK 按钮，保持默认设置，单击 OK 按钮。

（3）设置湍流动能耗散率求解器

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | CFD Solver Controls | ENDS Solver CFD，弹出湍流动能方程求解器设置面板，选择求解方法为 TDMA，单击 OK 按钮，保持默认设置，单击 OK 按钮。

13．设置流体对流项

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Advection，弹出图 22-35 所示的流体对流项设置面板，按照图 22-35 进行设置。

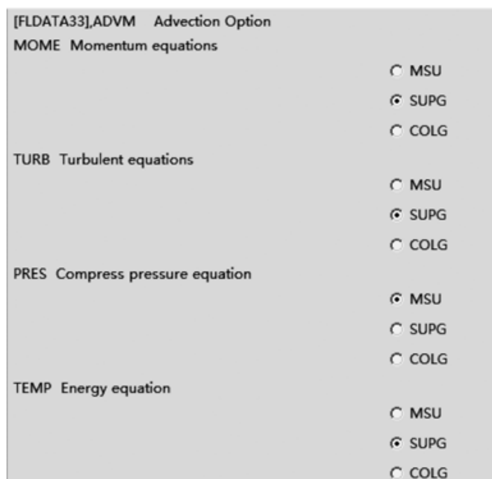


图 22-35 流体对流项设置面板

14．设置瞬态求解算法

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Transient Ctrl | Time Integration，弹出图 22-36 所示的瞬态求解算法设置面板，设置算法为纽马克法（Newmark），单击 OK 按钮。

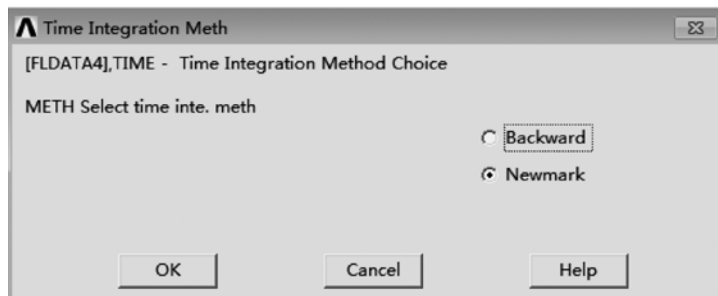


图 22-36 瞬态求解算法设置面板

22.2.3 多场耦合求解设置

1．激活多场耦合求解器

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up，弹出图 22-37 所示的激活多场求解器设置面板，选择 ON，单击 OK 按钮，弹出图 22-38 所示的设置多场求解方法面板，选择单代码多场求解器（MFS-Single Code），单击 OK 按钮。

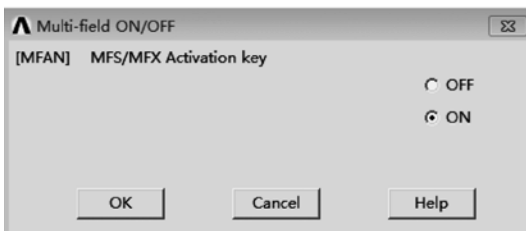


图 22-37 激活多场求解器设置面板



图 22-38 设置多场求解方法面板

2．定义场

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Define | Define，弹出图 22-39 所示的定义场设置面板，设置场号为 1，选择场单元类型为 FLUID141，设置场名为 fulid，单击 Apply 按钮；继续设置场号为 2，选择场单元类型为 PLANE182，设置场名为 struc，单击 OK 按钮。

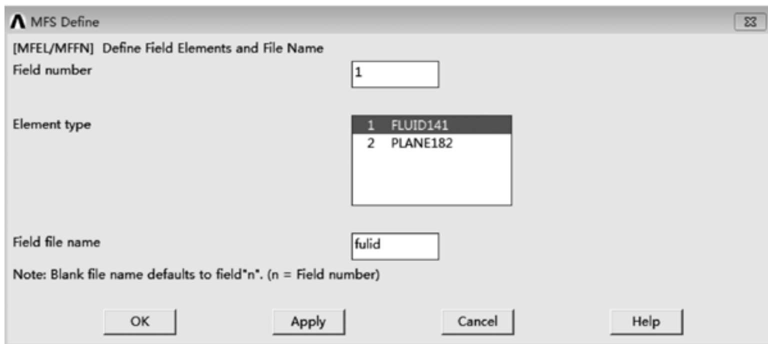


图 22-39 定义场设置面板

3．捕获场

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Capture，弹出图

22−40 所示的多场求解捕获场选项设置面板，选择场号（Filed number）为 1，单击 OK 按钮；按照原操作路径，继续选择场号（Filed number）为 2，单击 OK 按钮。

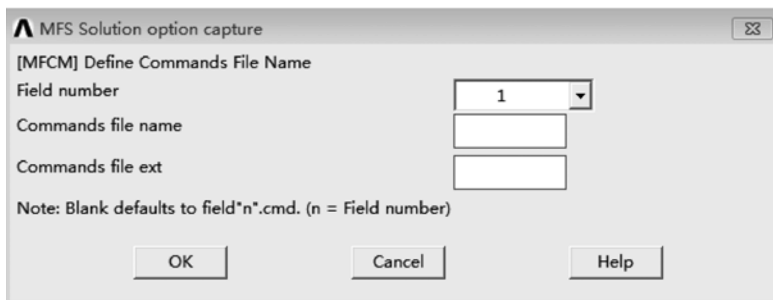


图 22−40　多场求解捕获场选项设置面板

4．设置场求解顺序

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Setup | Order，弹出图 22−41 所示的多场求解顺序设置面板，选择先求解场 2，即先求解固体场，然后求解场 1，即最后求解流场，单击 OK 按钮。

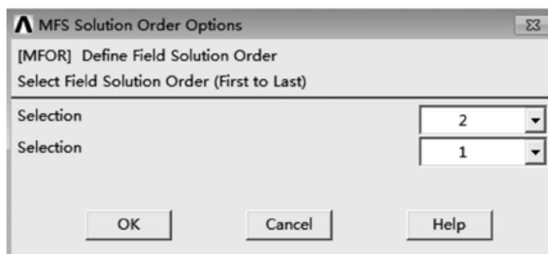


图 22−41　多场求解顺序设置面板

5．设置场界面载荷传递

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Interface | Surface，弹出图 22−42 所示的多场求解界面载荷传递选项，设置传递数据标签为 DISP，求解顺序为从场 2 到场 1，载荷的传递界面为 1，单击 Apply 按钮；继续设置传递数据标签为 FORC，求解顺序从场 1 到场 2，载荷的传递界面为 1，单击 OK 按钮。

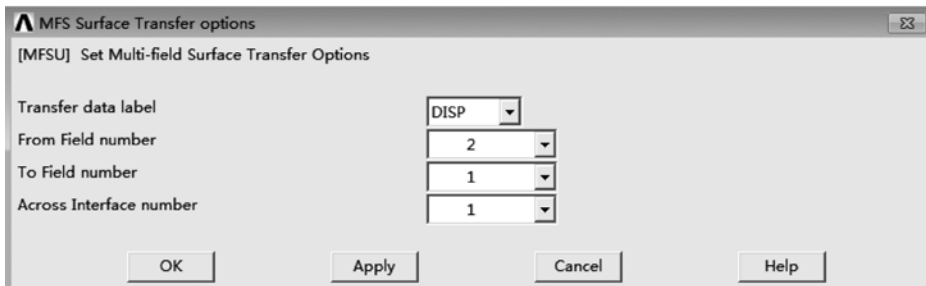


图 22−42　多场求解界面载荷传递选项

6．设置多场求解策略

（1）设置多场求解迭代次数

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Stagger | Iterations，弹出图 22-43 所示的多场求解迭代设置面板，设置最大迭代次数为（Maximum Stagger Iteration）为 5，最小迭代次数为 1，目标迭代次数为 5，单击 OK 按钮。

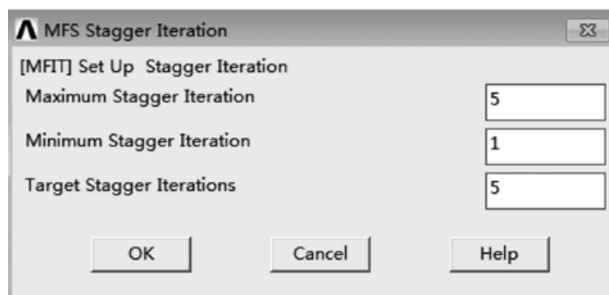


图 22-43　多场求解迭代设置面板

（2）设置多场求解松弛系数

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Stagger | Relaxation，弹出图 22-44 所示的多场耦合求解松弛系数设置面板，选择收敛项为 ALL，单击 OK 按钮，弹出图 22-45 所示的设置松弛系数面板，输入松弛系数为 0.3，单击 OK 按钮。

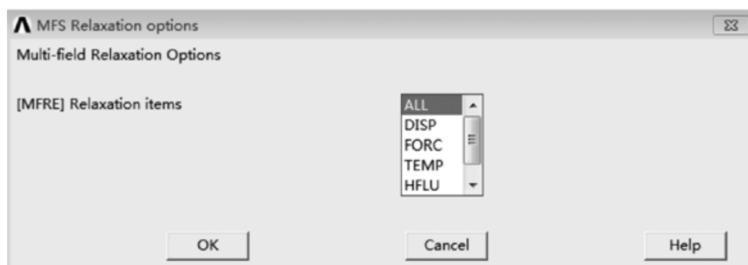


图 22-44　多场耦合求解松弛系数设置面板

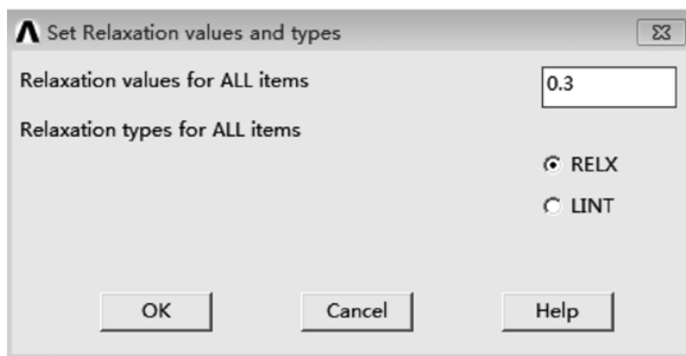


图 22-45　设置松弛系数面板

7．设置多场求解时间控制

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Time Ctrl，弹出图 22-46 所示的多场求解时间控制面板，设置多场求解结束时间为 1，初始时间步为 0.05，最小时间步为 0.05，最大时间步为 0.05，单击 OK 按钮。

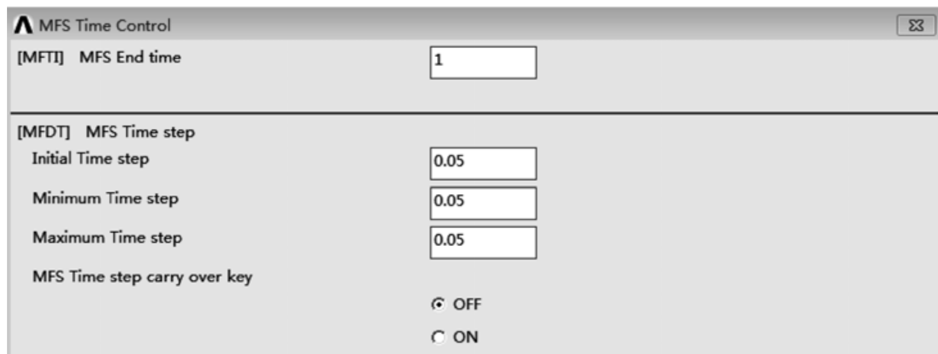


图 22-46　多场求解时间控制面板

22.2.4 多场求解

1．设置结构场载荷的加载方式

GUI：Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time-Time Step，弹出图 22-47 所示的瞬态求解时间步设置面板，设置多场求解结束时间为 1，时间步长为 0.05，载荷施加方式为阶跃加载，最小时间步为 0.05，最大时间步为 0.05，单击 OK 按钮。

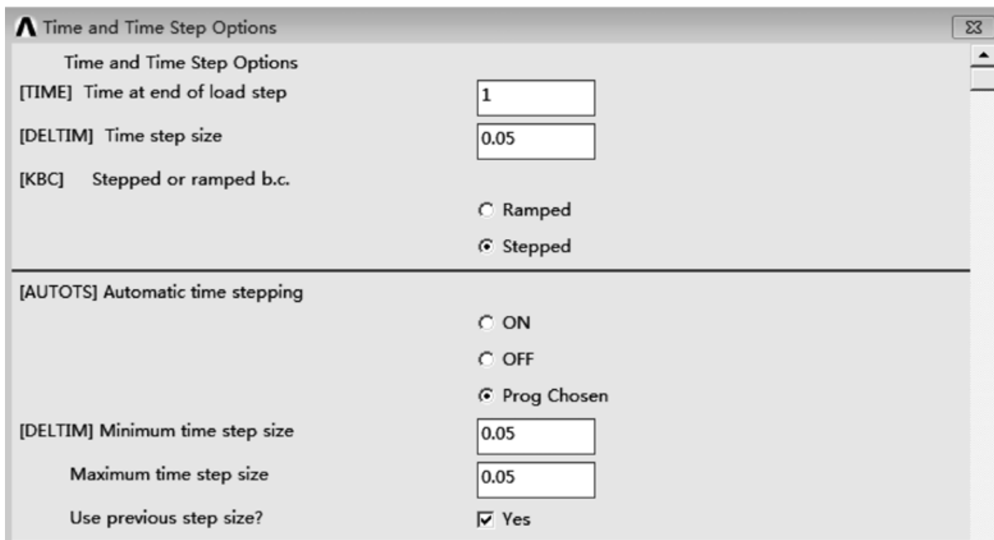


图 22-47　瞬态求解时间步设置面板

2．求解

GUI：Main Menu | Solution | Solve | Current LS，开始求解。

22.2.5 后处理

图 22-48～图 22-73 所示分别为在不同时刻流场和结构场的计算结果，具体查看方法，用户可以参见本章的视频教程。

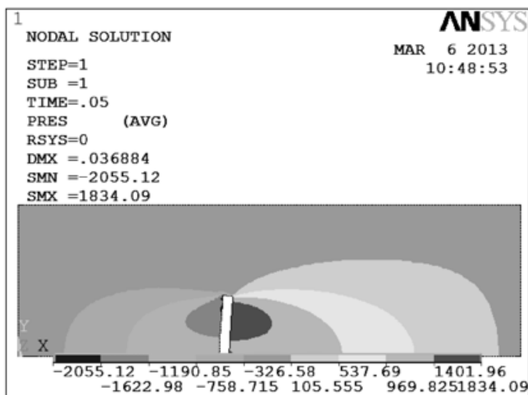


图 22-48 0.05s 时刻的流场压力云图

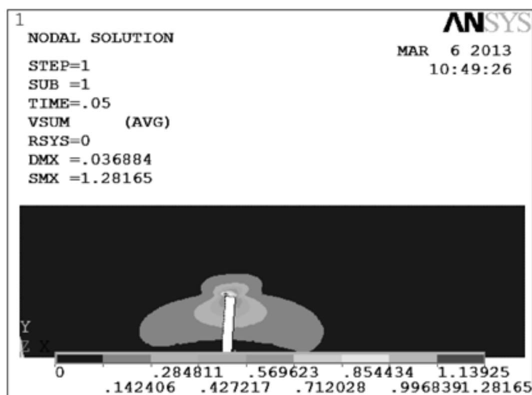


图 22-49 0.05s 时刻的流场速度云图

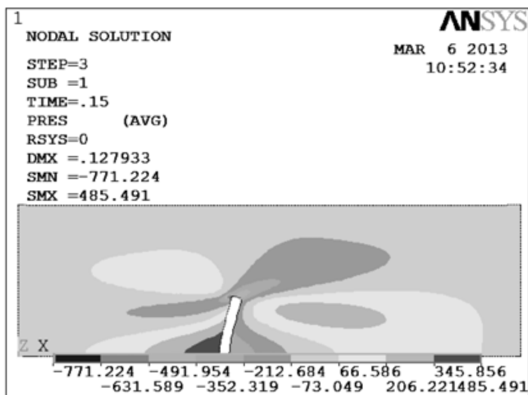


图 22-50 0.15s 时刻的流场压力云图

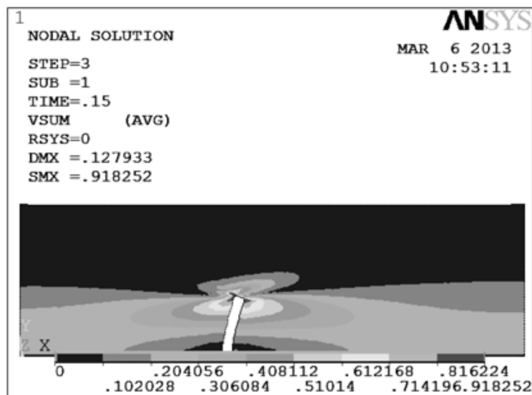


图 22-51 0.15s 时刻的流场速度云图

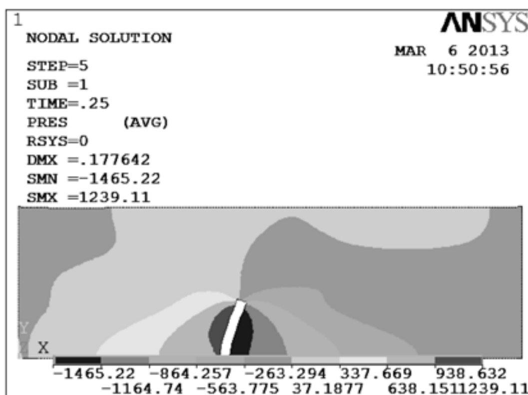


图 22-52 0.25s 时刻的流场压力云图

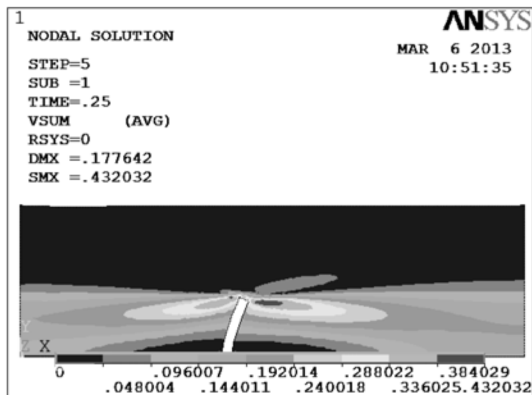


图 22-53 0.25s 时刻的流场速度云图

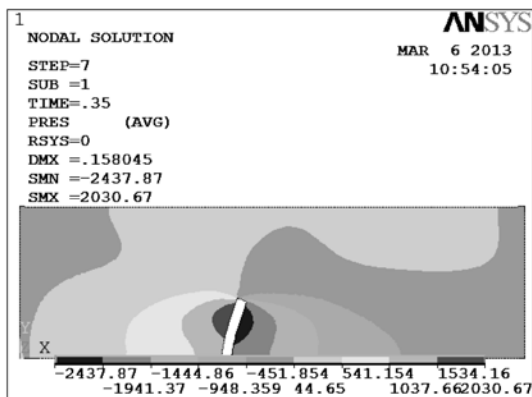


图 22-54 0.35s 时刻的流场压力云图

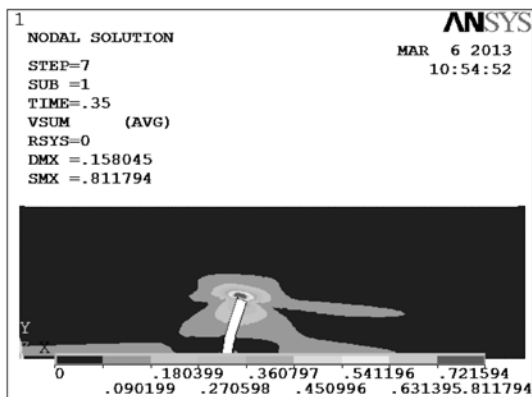


图 22-55 0.35s 时刻的流场速度云图

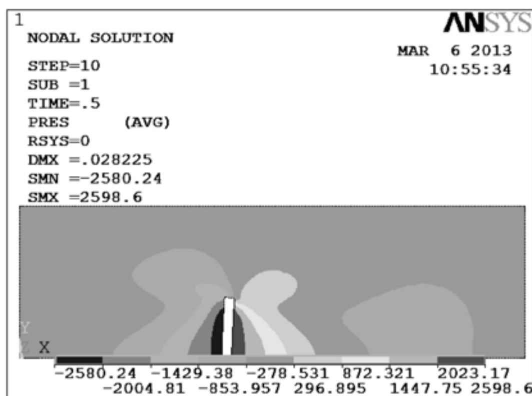


图 22-56 0.5s 时刻的流场压力云图

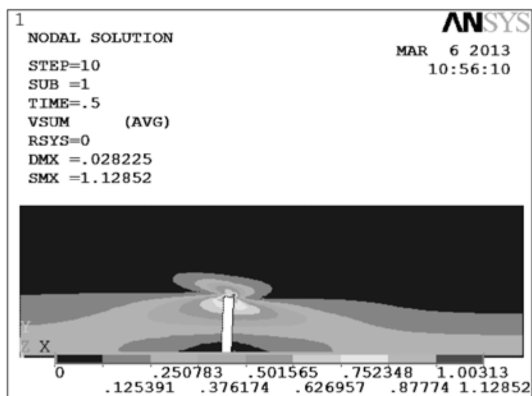


图 22-57 0.5s 时刻的流场速度云图

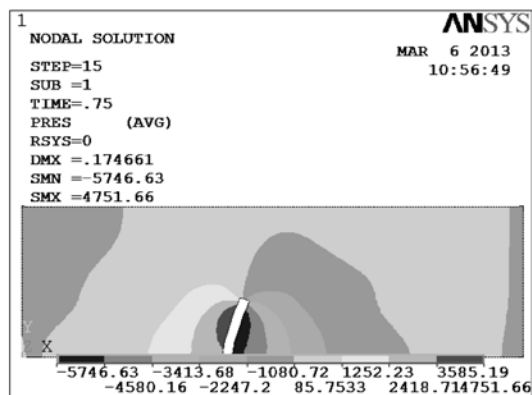


图 22-58 0.75s 时刻的流场压力云图

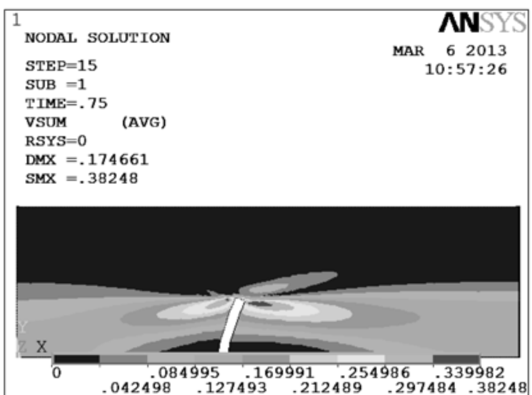


图 22-59 0.75s 时刻的流场速度云图



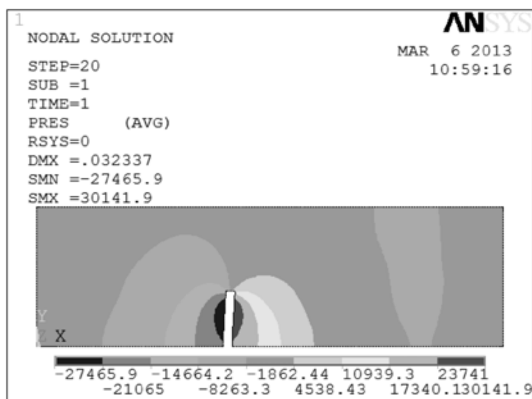


图 22-60 1s 时刻的流场压力云图

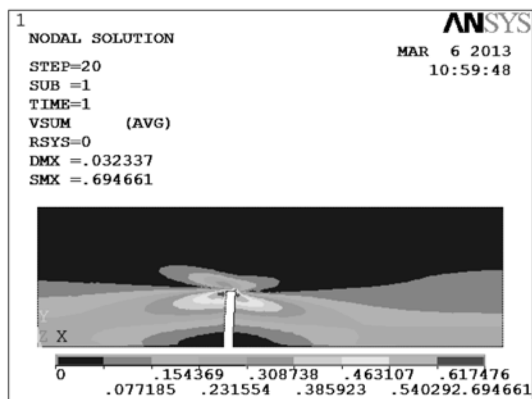


图 22-61 1s 时刻的流场速度云图

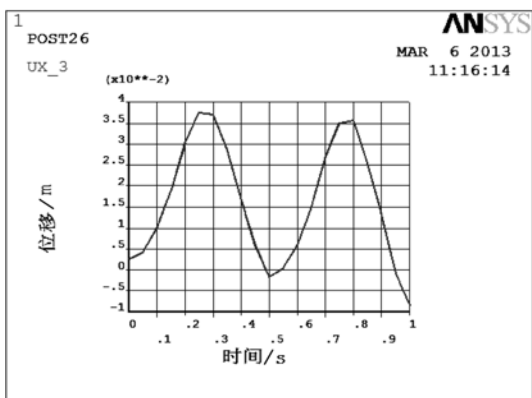


图 22-62 1200 节点处 X 方向速度与时间关系

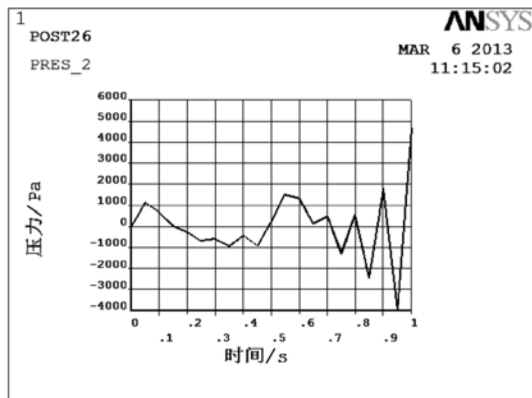


图 22-63 142 节点处压力与时间的关系

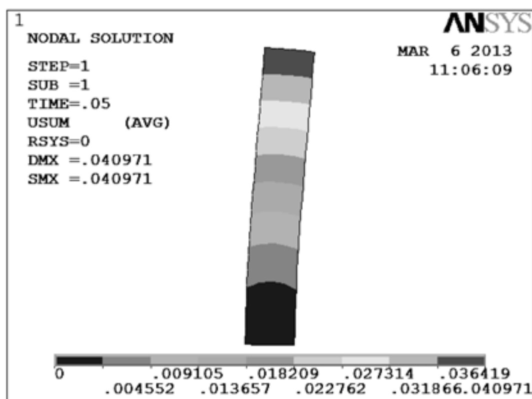


图 22-64 0.05s 时刻金属板位移云图

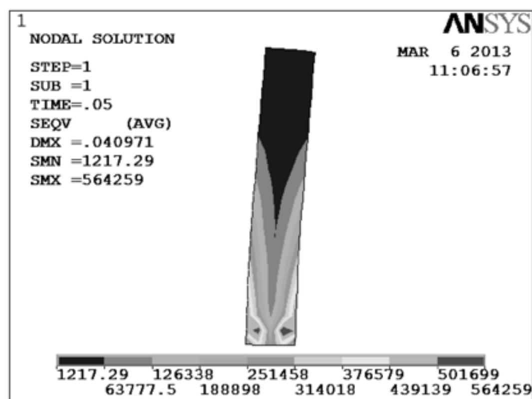


图 22-65 0.05s 时刻金属板等效应力云图

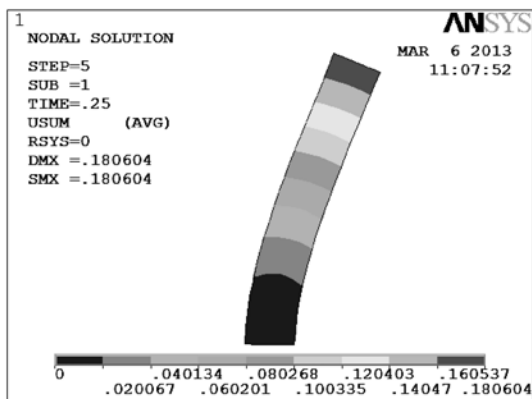


图 22-66　0.25s 时刻金属板位移云图

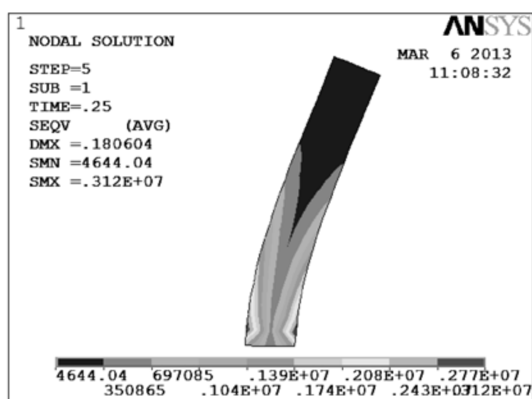


图 22-67　0.25s 时刻金属板等效应力云图

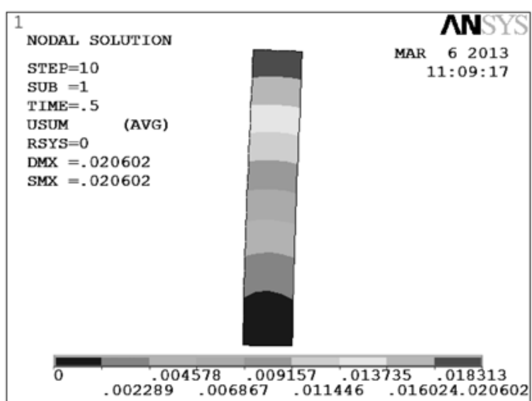


图 22-68　0.5s 时刻金属板位移云图

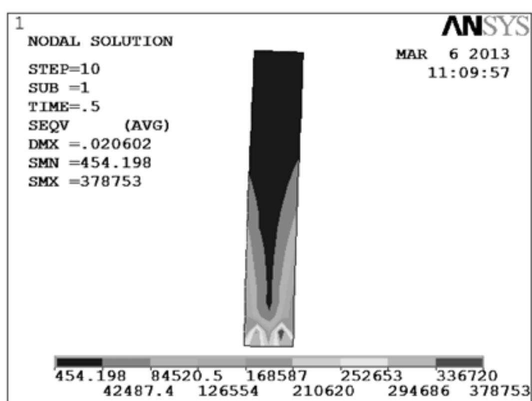


图 22-69　0.5s 时刻金属板等效应力云图

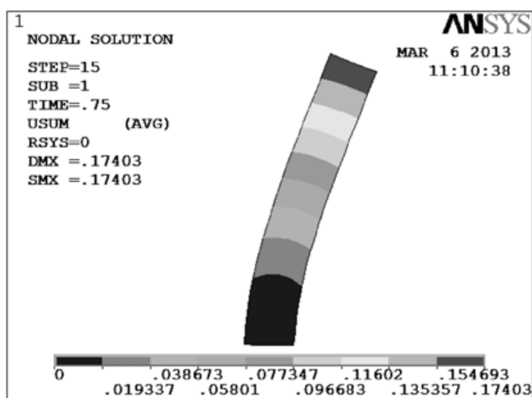


图 22-70　0.75s 时刻金属板位移云图

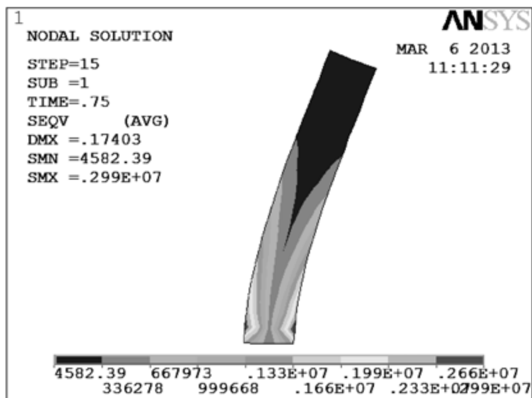


图 22-71　0.75s 时刻金属板等效应力云图

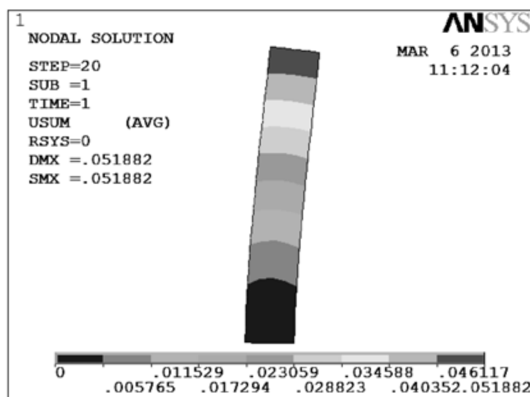


图 22-72　1s 时刻金属板位移云图

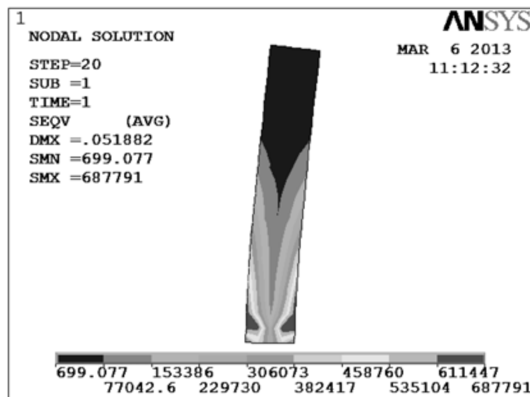


图 22-73　1s 时刻金属板等效应力云图

22.3　命令流

```
/FILNAME,Transient fluid-solid interaction ,0
/PREP7
ET,1,141            !定义流体单元
ET,2,PLANE182       !定义结构单元
KEYOPT,1,4,1        !设置流体单元关键字
!设置结构单元关键字
KEYOPT,2,1,3
KEYOPT,2,3,2
KEYOPT,2,6,1
!定义金属板得材料参数
MP,EX,2,3.5E7
MP,PRXY,2,0.35
MP,DENS,2,3000
!定义关键点
K,1,0,0
K,2,2,0
K,3,2,0.6
K,4,2.1,0.6
K,5,2.1,0
K,6,5,0
K,7,5,1.5
K,8,0,1.5
K,9,2,0.6
K,10,2.1,0.6
!通过关键点定义面
A,1,2,3,4,5,6,7,8
A,2,9,10,5
!划分流体区域网格
ESIZE,0.03
```



```
TYPE,1
AMESH,1
!划分固体区域网格
TYPE,2
MAT,2
AMESH,2
!进入求解
/SOL
NLGEOM,1!激活结构大变形分析
!设置流场与结构场之间的载荷传递界面
SFL,2,FSIN,1,
SFL,3,FSIN,1,
SFL,4,FSIN,1,
SFL,9,FSIN,1,
SFL,10,FSIN,1,
SFL,11,FSIN,1,
!定义边界条件
DL,8, ,UX,
DL,8, ,UY
DL,8, ,PRES,0,1
!定义函数
*DEL,_FNCNAME
*DEL,_FNCMTID
*DEL,_FNC_C1
*DEL,_FNCCSYS
*SET,_FNCNAME,'P'
*DIM,_FNC_C1,,1
*SET,_FNC_C1(1),3.3E4
*SET,_FNCCSYS,0
!
*DIM,%_FNCNAME%,TABLE,6,6,1,,,,%_FNCCSYS%
!
*SET,%_FNCNAME%(0,0,1), 0.0, −999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,1), %_FNC_C1(1)%
*SET,%_FNCNAME%(4,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,1), 1.0, −1, 0, 360, 0, 0, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,2,1), 0.0, −2, 0, 1, −1, 3, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,3,1),      1, −1, 9, 1, −2, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,4,1), 0.0, −2, 0, 1, 17, 3, −1
*SET,%_FNCNAME%(0,5,1), 0.0, −1, 15, 1, −2, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,6,1), 0.0, 99, 0, 1, −1, 0, 0
!
DL,12, ,UX,
```

```
DL,12, ,UY
DL,1, ,UX,
DL,1, ,UY
DL,6, ,UX,
DL,6, ,UY
DL,5, ,UX,
DL,5, ,UY
DL,6, ,PRES,0,1
SFL,9,PRES,%P%,
DL,1, ,VX,0,1
DL,1, ,VY,0,1
DL,5, ,VX,0,1
DL,5, ,VY,0,1
DL,7, ,VY,0,1
!设置非线性求解选项
PRED,ON,,ON
LNSRCH,1
!设置流体求解选项
FLDATA1,SOLU,TRAN,1
FLDATA1,SOLU,FLOW,1
FLDATA1,SOLU,TURB,1
FLDATA1,SOLU,ALE,1
!设置求解算法
FLDATA,ALGR,SEGR,SIMPLEN
!设置求解控制
FLDATA4,TIME,STEP,0.05,
FLDATA4,TIME,NUMB,20
FLDATA4,TIME,TEND,1,
FLDATA4,TIME,GLOB,12,
FLDATA4,TIME,APPE,0.05,
FLDATA4,TIME,BC,0
!设置流体属性参数
FLDATA8,NOMI,DENS,1000,
FLDATA8,NOMI,VISC,0.00015,
!设置考虑流体的重力
ACEL,0,9.8,0,
!设置流体求解稳定参数
FLDATA26,STAB,VISC,0.25,
!设置流体求解器
FLDATA18,METH,PRES,1
FLDATA19,TDMA,PRES,150,
FLDATA18,METH,ENKE,1
FLDATA19,TDMA,ENKE,10,
FLDATA18,METH,ENDS,1
FLDATA19,TDMA,ENDS,10,
!设置流体对流项
```



```
FLDATA,ADVM,MOME,SUPG
FLDATA,ADVM,TURB,SUPG
FLDATA,ADVM,PRES,MSU
FLDATA,ADVM,TEMP,SUPG
!设置流体瞬态求解
FLDATA4,TIME,METH,NEWM
FLDATA4,TIME,DELTA,0.5,
!进入多场耦合求解器
MFAN,ON,MFSC
!定义场
MFEL,1,1, , , , , , , ,
MFFN,1,ff
MFEL,2,2, , , , , , , ,
MFFN,2,ss
!捕获场
MFCM,        1, ,
MFCM,        2, ,
!设置场的求解顺序
MFOR,        2,        1
!设置场界面载荷传递
MFSU,        1,        2,DISP,        1
MFSU,        1,        1,FORC,        2
!设置求解策略
MFIT,5,1,5,
MFRE,ALL,0.3,RELX
MFTI,1,
MFDT,0.05,0.05,0.05,0
!设置结构场求解载荷步
TIME,1
DELTIM,0.05,0.05,0.05,1
KBC,1
!开始求解
SOLVE
```

第 23 章　三通管的流-固-热稳态双向耦合分析

23.1　问题的描述

23.1.1 几何模型

图 23-1 所示为三通管的几何模型，三通管的几何尺寸如图所示。热水从三通管的左侧流入，冷水从三通管的顶端流入，然后从三通管的右侧流出。

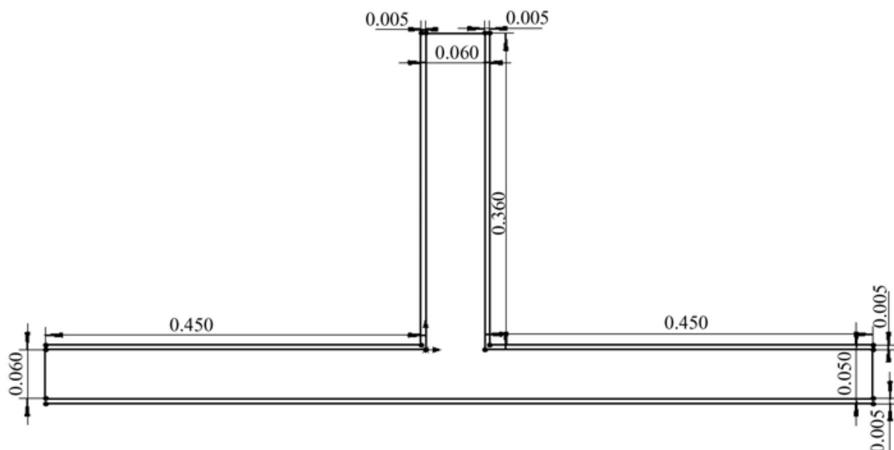


图 23-1　三通管的几何模型

23.1.2 材料参数

该实例的流体为水，其密度为 1000kg/m^3，粘度为 0.00015kg/（m/s），导热系数为 0.6W/（m/℃），比热容为 4182J/（kg·K）；三通管的管壁为普通钢，其密度为 7580kg/m^3，弹性模型模量为 2×10^{11}Pa，泊松比为 0.3，热膨胀系数为 1.2×10^{-5}，导热系数为 60.5 W/（m/℃）。

23.1.3 选择单元

本实例选用二维流体单元 FLUID141 单元模拟流体区域，使用 PLANE223 单元模拟三通

管管壁。

23.1.4 流体流动模型

该实例假设流体的流动状态为湍流，并且使用 k – ε 湍流模型。

23.1.5 边界条件及载荷

流体边界条件：左侧入口的速度为 3m/s，水温为 400K，顶端入口的速度为 5m/s，水温为 300K，右侧的出口压力为 0；管壁的边界条件：完全约束三通管的两个入口和一个出口，并约束三通管底边的 *Y* 方向位移。

23.2 GUI 操作

23.2.1 前处理

1．定义文件名

GUI：Utility Menu | File | Change Jobname，弹出一个对话框，在文本框中输入“Flow-solid-thermal coupling”，单击 OK 按钮。

2．选择单元

（1）定义单元

GUI：Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击 Add 按钮，弹出图 23-2 所示的选择单元对话框，选择左侧中的 FLOTRAN CFD 项，然后在右边选择 2D FLOTRAN 141 单元，单击 Apply，继续选择左侧中的 Coupled Field 项，然后在右边选择 Quad 8 node 223 项，单击 OK 按钮。

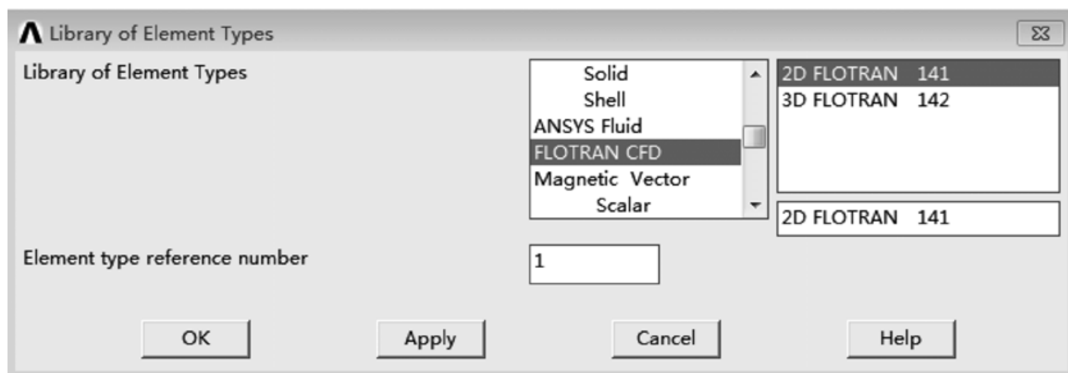


图 23-2　选择单元对话框

（2）设置单元关键字

在单元类型对话框中选择 FLUID141 项，然后单击 Options 按钮，弹出如图 23-3 所示的 FULID141 单元关键字设置面板，将支持网格位移自由度选项（Support mesh disp. DOFS）设置为 Yes，单击 OK 按钮，返回单元类型界面，继续在单元类型对话框中选择 PLANE223

项，然后单击 Options 按钮，弹出如图 23-4 所示的 PLANE223 单元关键字设置面板，设置分析类型（Analysis Type）为热-结构，单击 OK 按钮，返回单元类型界面，单击 Close 按钮。

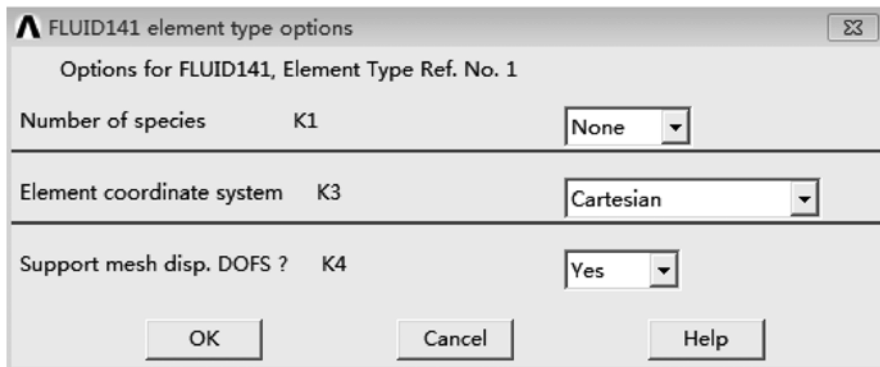


图 23-3　FULID141 单元关键字设置面板

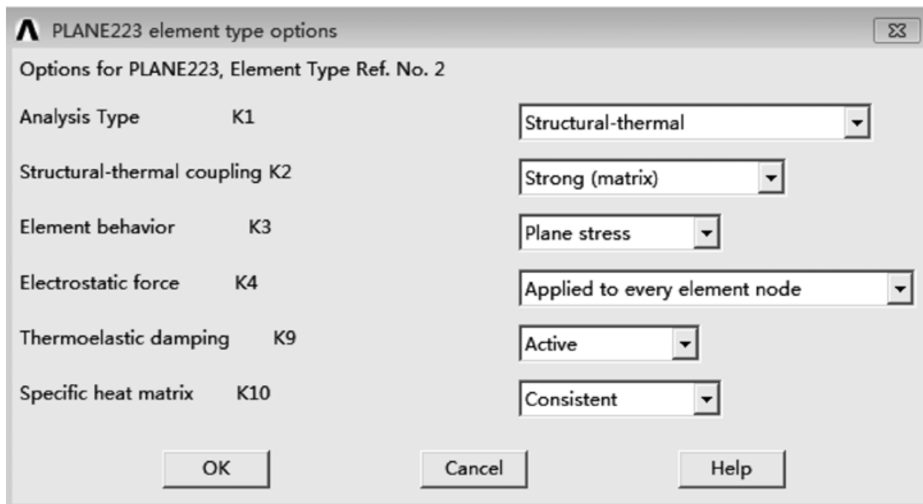


图 23-4　PLANE223 单元关键字设置面板

3．定义材料模型

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Material Props｜Material Models，弹出一个对话框，选择菜单命令 Material｜New Modle，在弹出的对话框的文本框中输入材料号为“2”，选择菜单命令 Structural｜Elastic｜Isotropic，弹出图 23-5 所示的线弹性材料参数设置面板，设置弹性模量 EX=2×10^{11}，泊松比 PRXY=0.35，单击 OK 按钮，关闭对话框，继续选择菜单命令 Structural｜Elastic｜Density，弹出图 23-6 所示的材料密度设置面板，输入密度 DENS=7850，继续选择菜单命令 Structural｜Thermal Expansion｜Secant Coefficient｜Isotropic，弹出图 23-7 所示的材料的热膨胀系数设置面板，设置参考温度 295，热膨胀系数为 1.2×10^{-5}，继续选择菜单命令 Thermal｜Conductivity｜Isotropic，弹出图 23-8 所示的材料的导热系数设置面板，设置导热系数为 60.5，单击 OK 按钮关闭对话框。选择菜单命令

Material | Exit，退出定义材料模型行为的面板。

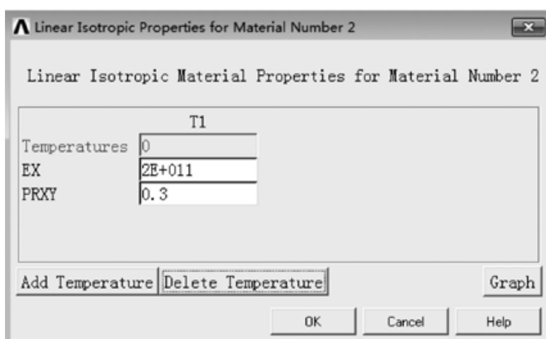


图 23-5 线弹性材料参数设置面板

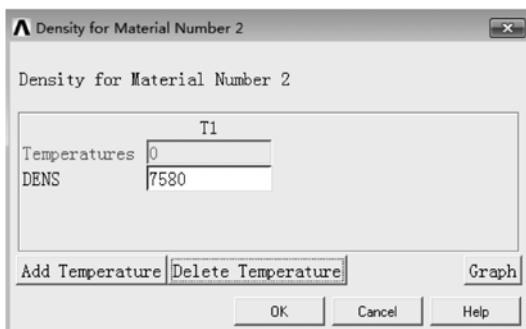


图 23-6 材料密度设置面板

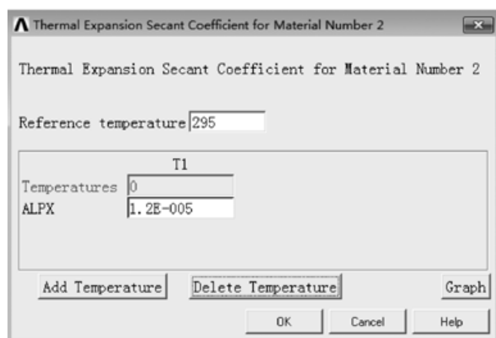


图 23-7 材料的热膨胀系数设置面板

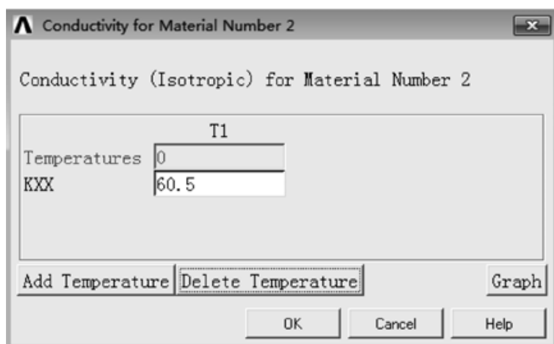


图 23-8 材料的导热系数设置面板

4．建立模型

（1）定义关键点

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS，弹出图 23-9 所示的在激活坐标系中定义关键点面板，在面板中关键点号（Keypoint number）文本框中输入“1”，在激活的坐标系中设置 X=-0.45、Y=-0.055、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 2，X=0.51、Y=-0.055、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 3，X=0.51、Y=-0.05、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 4，X=0.51、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 5，X=0.51、Y=0.005、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 6，X=0.065、Y=0.005、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 7，X=0.06、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 8，X=0.065、Y=0.35、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 9，X=0.06、Y=0.35、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 10，X=0、Y=0.35、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 11，X=-0.005、Y=0.35、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 12，X=-0.005、Y=0.005、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 13，X=0、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 14，X=-0.45、Y=0.005、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 15，X=-0.45、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 16，X=-0.45、Y=-0.05、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键

点号为 17，X=−0.45、Y=−0.05、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 18，X=0.51、Y=−0.05、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 19，X=0.51、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 20，X=0.06、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 21，X=0.06、Y=0.35、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 22，X=0、Y=0.35、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 23，X=0、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 23，X=−0.45、Y=0、Z=0，单击 OK 按钮。

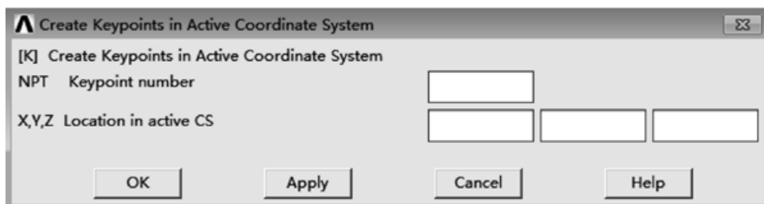


图 23-9　定义关键点面板

（2）定义面

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Create｜Areas｜Arbitrary｜Through KPs，弹出如图 23-10 所示的拾取对话框，在文本框中输入关键点编号为“1,2,3,16”，单击 Apply 按钮，继续在拾取对话框的文本框的文本框中输入关键点编号为“17,18,19,20,21,22,23,24”，单击 Apply 按钮，继续在拾取对话框的文本框中输入关键点编号为“4,5,6,8,9,7”，单击 Apply 按钮，继续在拾取对话框的文本框中输入关键点编号为“10,11,12,14,15,13”，单击 OK 按钮。

5．网格划分

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Meshing｜MeshTool

（2）设置总体网格尺寸

选择图 23-11 所示的网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设置（Set）按钮，弹出图 23-12 所示的总体网格尺寸设置面板。

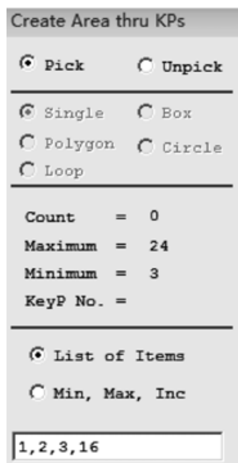


图 23-10　拾取对话框

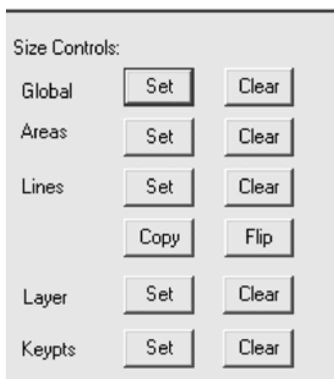


图 23-11　网格划分工具面板中尺寸控制子面板

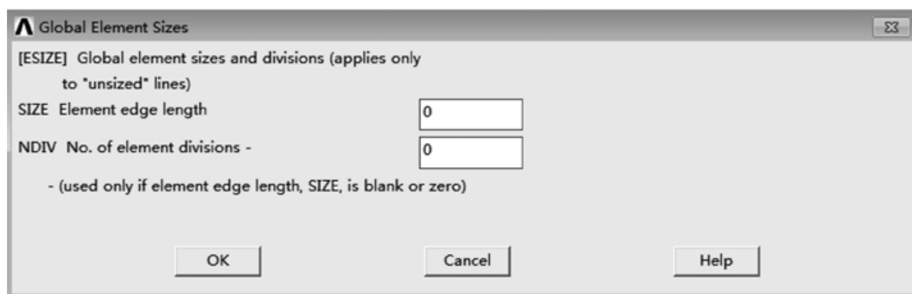

Global Element Sizes
[ESIZE] Global element sizes and divisions (applies only to "unsized" lines)
SIZE Element edge length 0
NDIV No. of element divisions - 0
- (used only if element edge length, SIZE, is blank or zero)
OK Cancel Help

图 23-12 总体网格尺寸设置面板

该设置面板中存在两个控制选项，即单元尺寸控制（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸文本框中输入“0.003”，单击 OK 按钮。

（3）划分流体区域网格

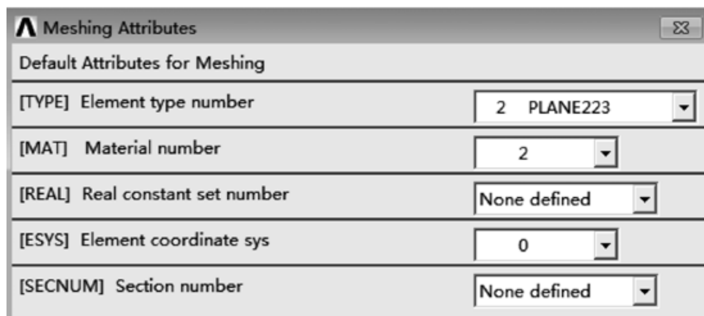
单击网格划分工具面板上的网格划分（Mesh）按钮，弹出拾取对话框，拾取面 A2，单击 OK 按钮。

（4）设置网格属性

单击网格划分工具面板上单元属性（Element Attributes）的设置（Set）按钮，弹出图 23-13 所示的网格属性设置面板，选择单元类型号（Element type number）为 2 PLANE223，材料号为 2，其他保持默认设置，单击 OK 按钮。

（5）划分固体区域网格

单击网格划分工具面板上的网格划分（Mesh）按钮，弹出拾取对话框，拾取面 A1、A3 和 A4，单击 OK 按钮。


Meshing Attributes
Default Attributes for Meshing

[TYPE] Element type number	2 PLANE223
[MAT] Material number	2
[REAL] Real constant set number	None defined
[ESYS] Element coordinate sys	0
[SECNUM] Section number	None defined

图 23-13 网格属性设置面板

23.2.2 求解基本设置

1．设置流场与结构场之间的界面

（1）定义流场界面

GUI：Main Menu | Solution Type | Define Loads | Apply | Field Surface Intr | On Lines，弹出图 23-14 所示的定义界面的拾取对话框，在文本框中输入线的编号为“18,17,24,23,3”，单击 OK 按钮，弹出图 23-15 所示的在线上定义界面设置面板，设置界面号为 1，单击 OK 按钮。

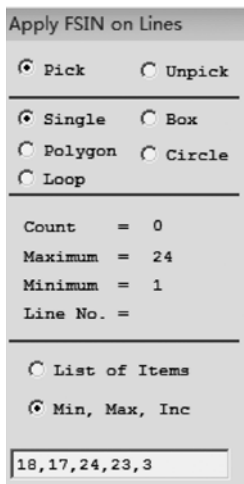


图 23-14　定义界面的拾取对话框

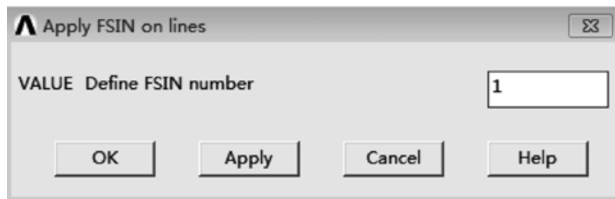


图 23-15　在线上定义界面设置面板

（2）定义结构场界面

GUI：Main Menu｜Solution Type｜Define Loads｜Apply｜Field Surface Intr｜On Lines，弹出图 23-14 所示的定义界面的拾取对话框，在文本框中输入线的编号为“7,8,10,11,5”，单击 OK 按钮，弹出图 23-15 所示的在线上定义界面设置面板，设置界面号为 1，单击 OK 按钮。

2．定义流体边界条件

（1）定义左侧入口流速

GUI：Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Fluid/CFD｜Velocity｜On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L12，单击 OK 按钮，弹出图 23-16 所示的在线处施加速度设置面板，设置 VX=3 和 VY=0，单击 OK 按钮。

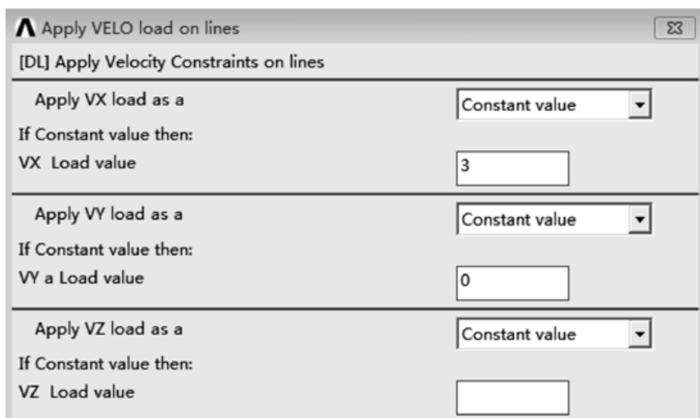


图 23-16　在线处施加速度设置面板

（2）定义左侧入口温度

GUI：Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Thermal｜Temperature｜On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L12，单击 OK 按钮，弹出图 23-17 所示的在线处施加温度设置面

板，选择约束的自由度类型为 TEMP，设置约束值为 400，单击 OK 按钮。

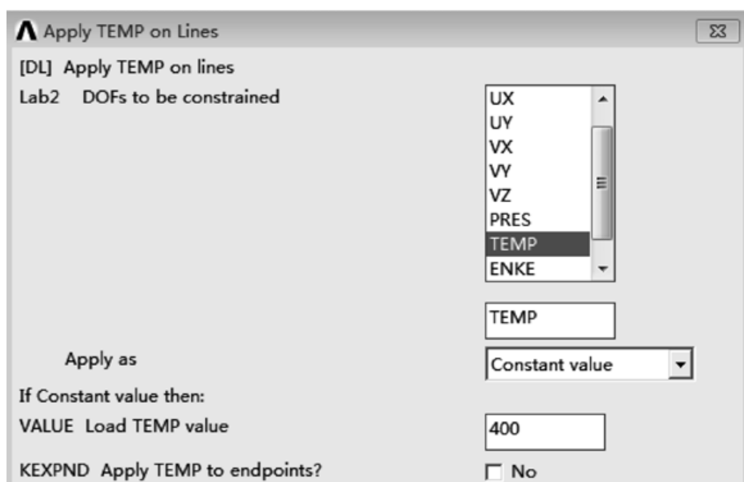


图 23-17 在线处施加温度设置面板

（3）定义顶端入口流速

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Velocity | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L9，单击 OK 按钮，弹出图 23-16 所示的在线处施加速度设置面板，设置 VX=0 和 VY=-5，单击 OK 按钮。

（4）定义顶端入口温度

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Thermal | Temperature | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L9，单击 OK 按钮，弹出图 23-17 所示的在线处施加温度设置面板，选择约束的自由度类型为 TEMP，设置约束值为 300，单击 OK 按钮。

（5）定义左侧出口压力

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Fluid/CFD | Pressure DOF | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L6，单击 OK 按钮，弹出图 23-18 所示的在线上施加压力设置面板，设置压力值为 0，单击 OK 按钮。

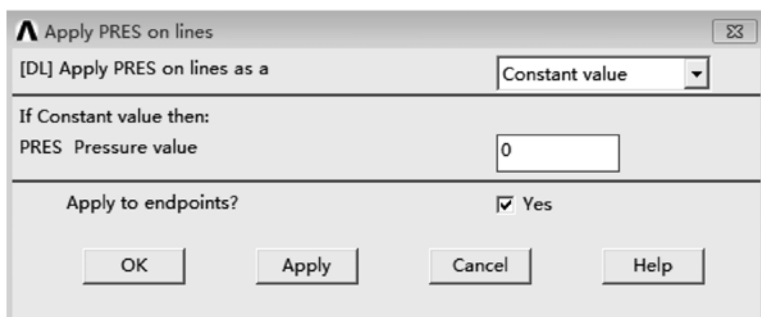


图 23-18 在线上施加压力设置面板

3．定义固体边界条件

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On

Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L19、L16、L22、L4、L13 和 L2，单击 OK 按钮，弹出图 23-19 所示的在线上施加约束设置面板，选择约束类型为 UX，单击 Apply 按钮，弹出拾取对话框，拾取线 L22、L4、L19、L16、L13、L2 和 L1，单击 OK 按钮，弹出图 23-19 所示的在线上施加约束设置面板，选择约束类型为 UY，单击 OK 按钮。

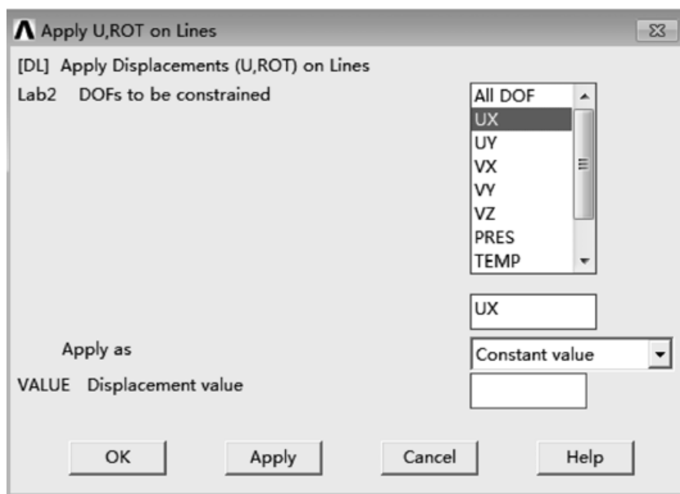


图 23-19　在线上施加约束设置面板

4．设置流体求解选项

GUI：Main Menu｜Solution｜FLOTRAN Set Up｜Solution Options，弹出图 23-20 所示的流体求解选项设置面板；设置 TEMP 选项为 Thermal，即求解能量方程，设置 TURB 选项为 Turbulent，即流体流动状态为湍流，激活允许网格运动（Allow mesh motion？），其他选项保持默认值，单击 OK 按钮。

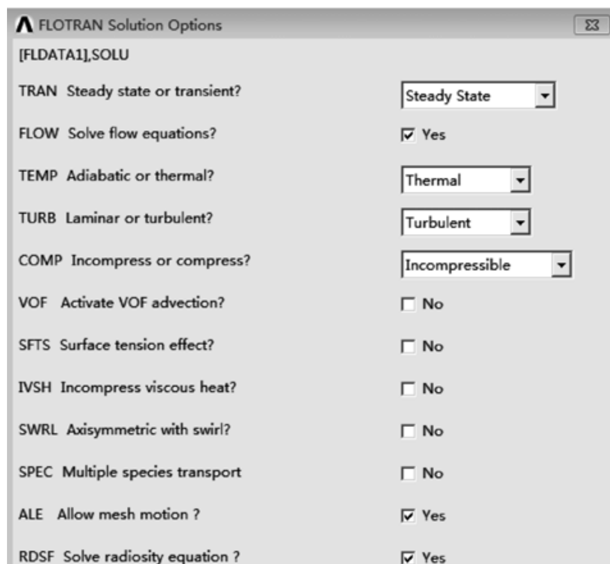


图 23-20　流体求解选项设置面板

5．设置求解算法

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Algorithm Ctrl，弹出图 23-21 所示的算法控制设置面板，选择增强型的 SIMPLEN 算法（SIMPLEN:Enhanced Algorithm），单击 OK 按钮。

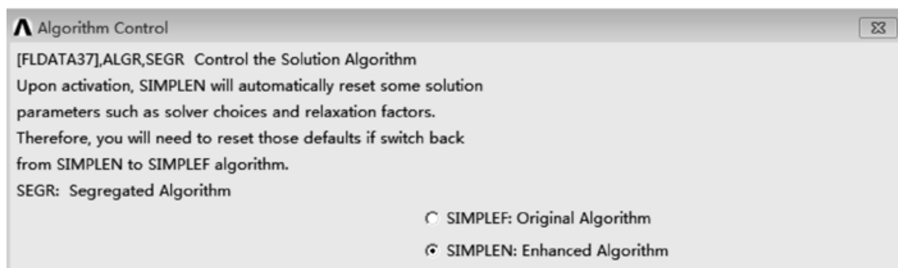


图 23-21 算法控制设置面板

6．设置流体属性参数

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Fluid Properties，弹出图 23-22 所示的流体属性参数设置面板，设置密度选项为常数（Constant），设置粘度选项为常数（Constant），设置导热选项为常数，设置比热容选项为常数，单击 OK 按钮，弹出图 23-23 所示的计算流体属性设置面板，设置流体密度为 1000，粘度为 0.00015，导热系数为 0.6，比热容为 4182，单击 OK 按钮。

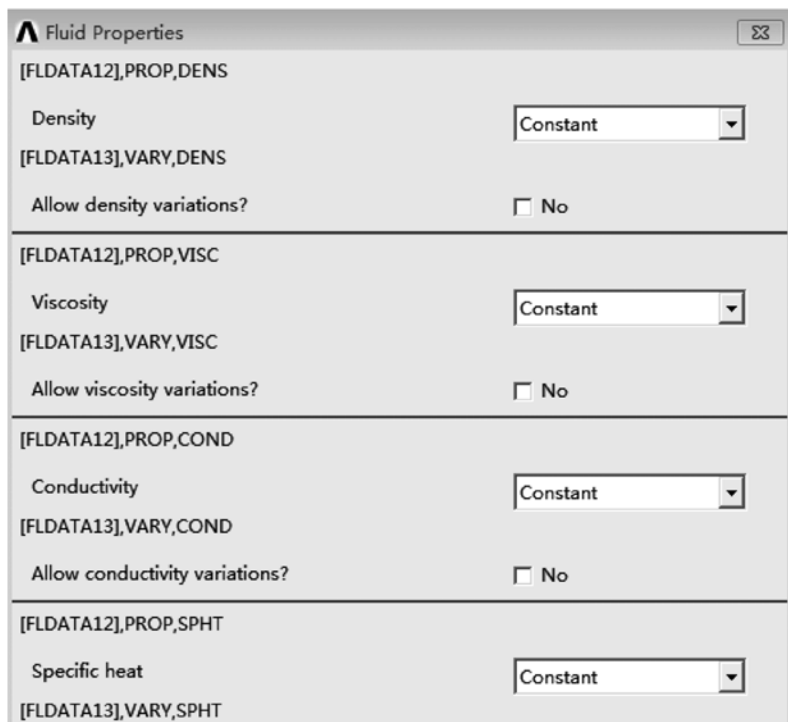


图 23-22 流体属性参数设置面板

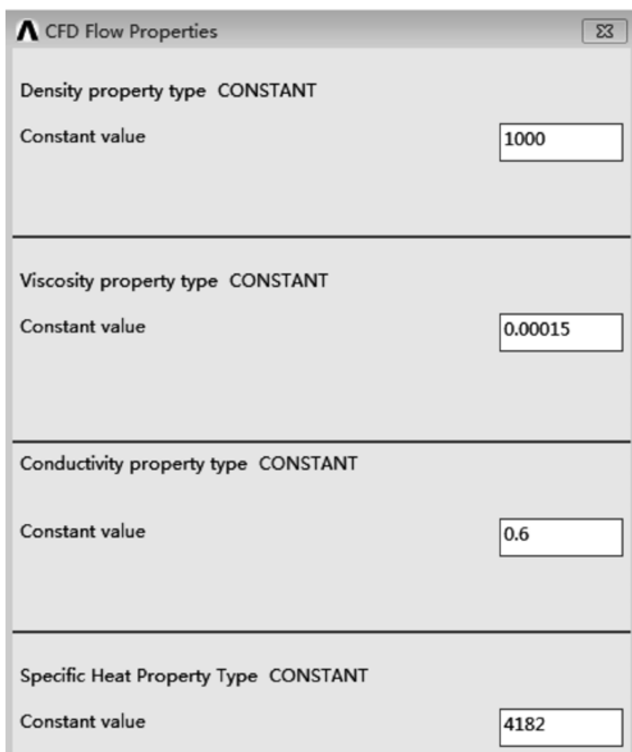


图 23-23 计算流体属性设置面板

7．设置流体环境

GUI：Main Menu｜Solution｜FLOTRAN Set Up｜Flow Enviroement｜Gravity，弹出图 23-24 所示的流体重力设置面板，因为考虑流体竖直向下的重力，因此设置 *Y* 方向加速度为 9.8，单击 OK 按钮。

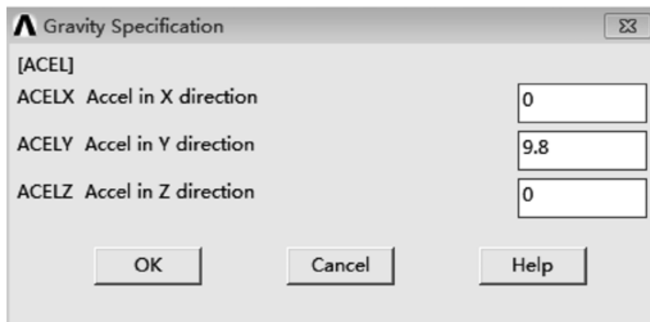


图 23-24 流体重力设置面板

8．设置流体求解稳定参数

GUI：Main Menu｜Solution｜FLOTRAN Set Up｜Relax/Stab/Cap｜Stability Parms，弹出图 23-25 所示的流体求解稳定参数设置面板，设置人工阻尼（Artificial viscosity）为 0.25，单击 OK 按钮。

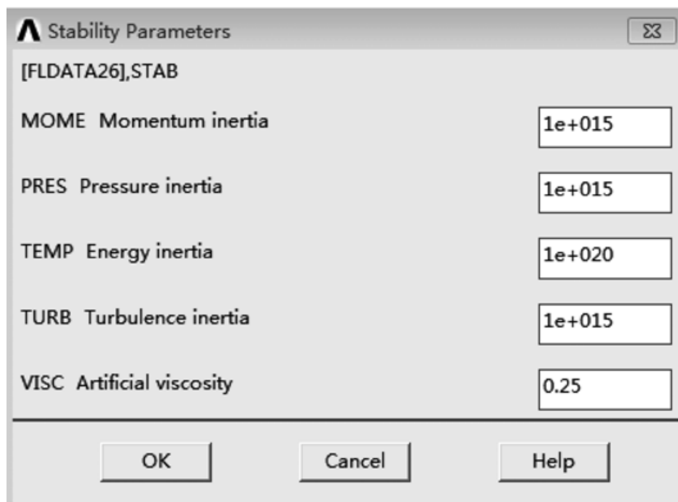


图 23-25 流体求解稳定参数设置面板

9．设置压力方程求解器

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | CFD Solver Controls | PRES Solver CFD，弹出图 23-26 所示的压力方程求解器设置面板，选择求解方法为 TDMA，单击 OK 按钮，弹出图 23-27 所示的 TDMA 方法迭代次数设置面板，设置迭代次数为 700，单击 OK 按钮。

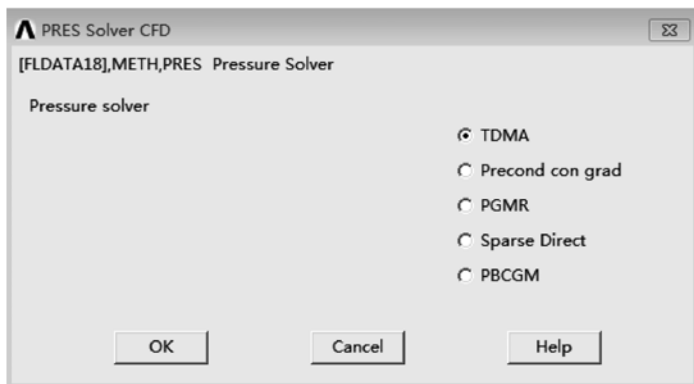


图 23-26 压力方程求解器设置面板

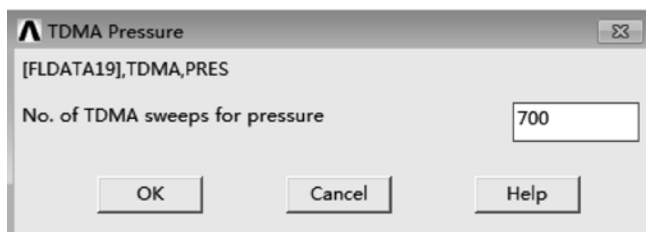


图 23-27 TDMA 方法迭代次数设置面板

10．设置流体对流项

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Advection，弹出图 23-28 所示的流体对流项设置面板，按照图 23-28 进行设置。

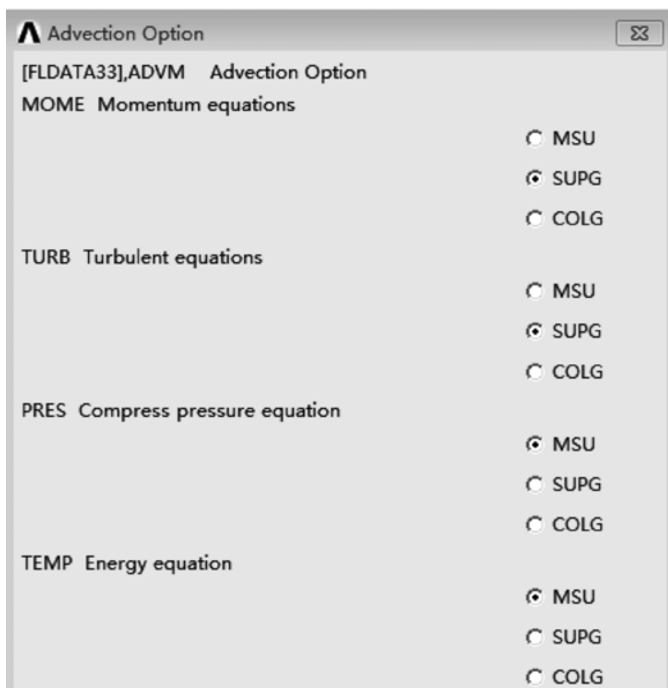


图 23-28　流体对流项设置面板

23.2.3 多场耦合求解设置

1．激活多场耦合求解器

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up，弹出图 23-29 所示的激活多场求解器设置面板，选择 ON，单击 OK 按钮，弹出图 23-30 所示的设置多场求解方法面板，选择单代码多场求解器（MFS-Single Code），单击 OK 按钮。

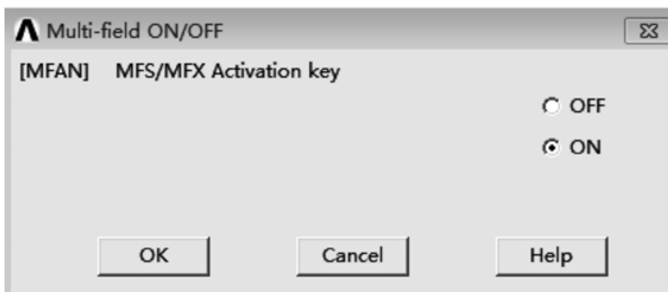


图 23-29　激活多场求解器设置面板



图 23-30　设置多场求解方法面板

2．定义场

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Define | Define，弹出图 23-31 所示的定义场设置面板，设置场号为 1，选择场单元类型为 FLUID141，设置场名为 fulid，单击 Apply 按钮，继续设置场号为 2，选择场单元类型为 PLANE223，设置场名为 struc，单击 OK 按钮。

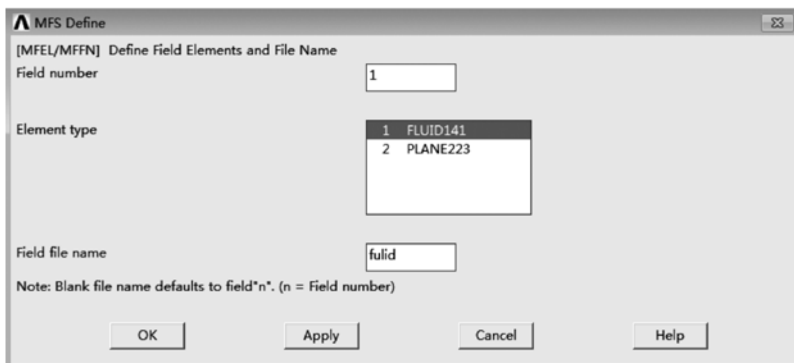


图 23-31　定义场设置面板

3．捕获场

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Capture，弹出图 23-32 所示的多场求解捕获场选项设置面板，选择场号（Filed number）为 1，单击 OK 按钮，按照原操作路径，继续选择场号（Filed number）为 2，单击 OK 按钮。

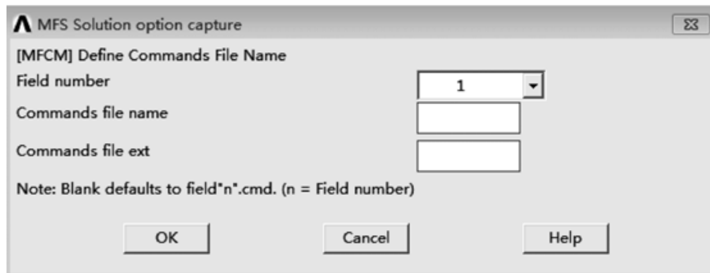


图 23-32　多场求解捕获场选项设置面板

4．设置场求解顺序

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Setup | Order，弹

出图 23-33 所示的多场求解顺序设置面板，选择先求解场 1，即先求解流场，然后求解场 2，即最后求解固体场，单击 OK 按钮。

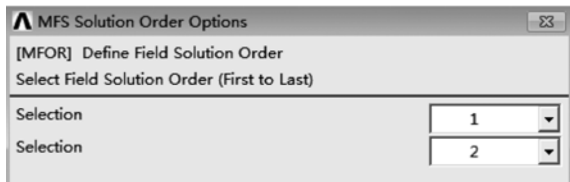


图 23-33 多场求解顺序设置面板

5．设置场界面载荷传递

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Interface | Surface，弹出图 23-34 所示的多场求解界面载荷传递选项，设置传递数据标签为 FORC，求解顺序为从场 1 到场 2，载荷的传递界面为 1，单击 Apply 按钮，继续设置传递数据标签为 TEMP，求解顺序从场 1 到场 2，载荷的传递界面为 1，单击 Apply 按钮，继续设置传递标签为 DISP，求解顺序从场 2 到场 1，载荷的传递界面为 1，单击 OK 按钮。



图 23-34 多场求解界面载荷传递选项

6．设置多场求解迭代次数

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Stagger | Iterations，弹出图 23-35 所示的多场求解迭代设置面板，设置最大迭代次数为（Maximum Stagger Iteration）为 11，最小迭代次数为 1，目标迭代次数为 11，单击 OK 按钮。

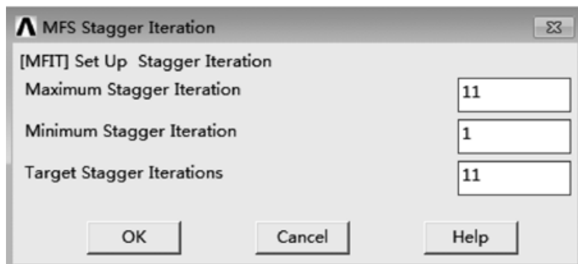


图 23-35 多场求解迭代设置面板

7．求解

GUI：Main Menu | Solution | Solve | Current LS，开始求解。

23.2.4 后处理

图 23-36～图 23-43 所示分别为三通管的流-固-热耦合分析的不同计算结果，查看具体的结果，用户可以参见本章视频教程。

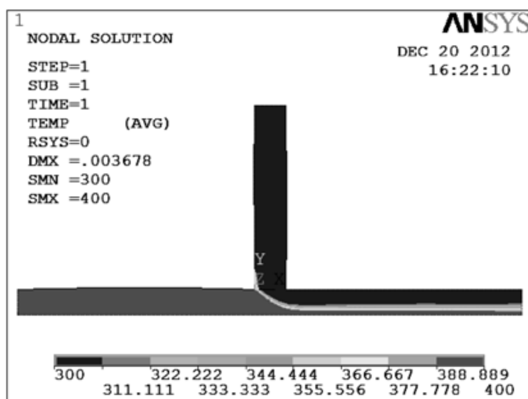


图 23-36 三通管中流体的温度云图

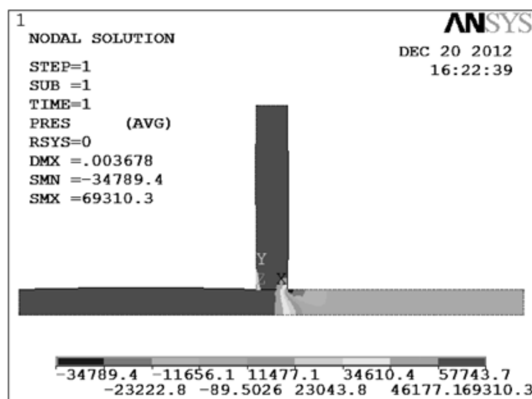


图 23-37 三通管中流体的压力云图

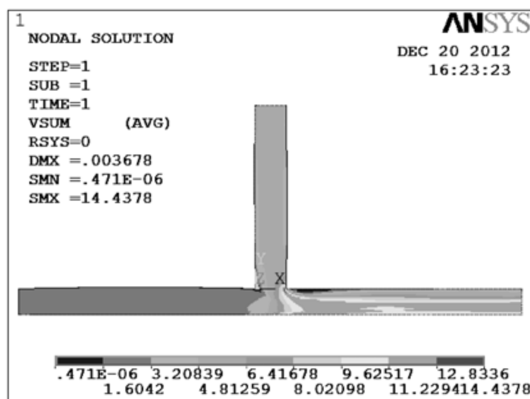


图 23-38 三通管中流体的流速云图

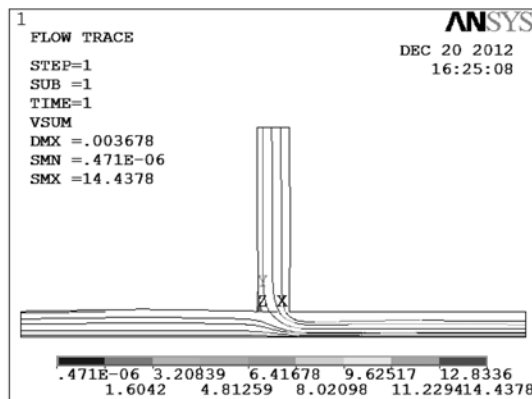


图 23-39 三通管中流体的迹线云图

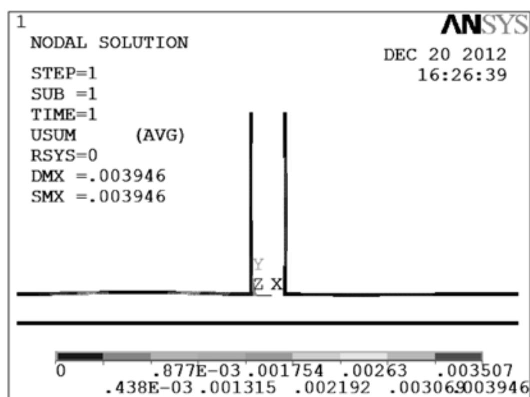


图 23-40 三通管中管壁的位移云图

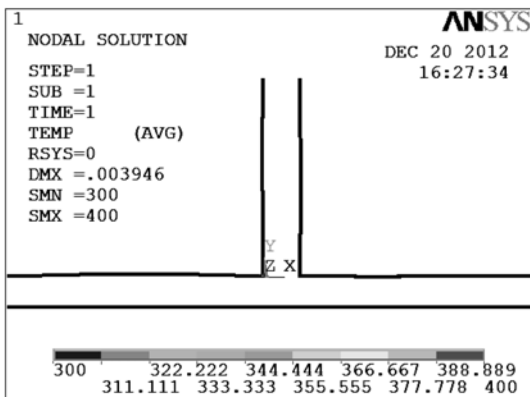


图 23-41 三通管中管壁的温度云图



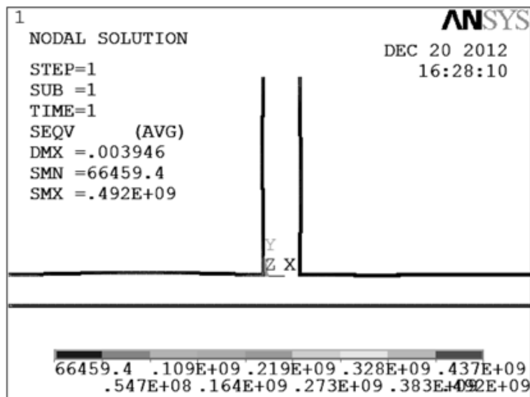


图 23-42　三通管中管壁的等效应力云图

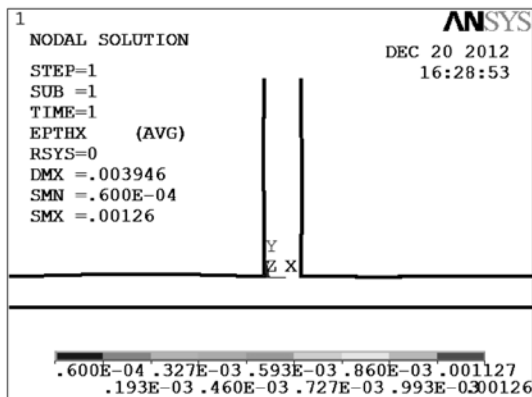


图 23-43　三通管中管壁的 *X* 方向热应变云图

23.3　命令流

```
/FILNAME,Flow-solid-thermal coupling ,0
/PREP7
ET,1,141              !定义流体分析单元
ET,2,PLANE223         !定义多场耦合单元
KEYOPT,2,1,11         !设置多场耦合单元关键字
KEYOPT,1,4,1          !设置流体分析单元关键字
!定义固体材料参数
UIMP,2,REFT,,,295
MP,ALPX,2,1.2E-5
MP,EX,2,2E11
MP,PRXY,2,0.3
MP,KXX,2,60.5
MP,DENS,2,7580
!建立模型
K,1,-0.45,-0.055
K,2,0.51,-0.055
K,3,0.51,-0.05
K,4,0.51,0
K,5,0.51,0.005
K,6,0.065,0.005
K,7,0.06,0
K,8,0.065,0.35
K,9,0.06,0.35
K,10,0,0.35
K,11,-0.005,0.35
K,12,-0.005,0.005
K,13,0,0,0
K,14,-0.45,0.005
K,15,-0.45,0
```



```
K,16,-0.45,-0.05
K,17,-0.45,-0.05
K,18,0.51,-0.05
K,19,0.51,0
K,20,0.06,0
K,21,0.06,0.35
K,22,0,0.35
K,23,0,0,0
K,24,-0.45,0
!通过关键点建立面
A,1,2,3,16
A,17,18,19,20,21,22,23,24
A,4,5,6,8,9,7
A,10,11,12,14,15,13
!划分流体区域网格
ESIZE,0.003
AMESH,2
!划分固体区域网格
MAT,2
TYPE,2
AMESH,1
AMESH,3
AMESH,4
!进入求解
/SOL
!设置流体与结构场之间的界面
SFL,18,FSIN,1,
SFL,17,FSIN,1,
SFL,24,FSIN,1,
SFL,23,FSIN,1,
SFL,3,FSIN,1,
SFL,7,FSIN,1,
SFL,8,FSIN,1,
SFL,10,FSIN,1,
SFL,11,FSIN,1,
SFL,5,FSIN,1,
!定义边界条件
DL,12, ,VX,3,1
DL,12, ,VY,0,1
DL,12, ,TEMP,400,0

DL,9, ,VX,0,1
DL,9, ,VY,-5,1
DL,9, ,TEMP,300,0
DL,6, ,PRES,0,1
DL,19, ,UX,
```

```
DL,16, ,UX,
DL,22, ,UX,
DL,4, ,UX,
DL,13, ,UX,
DL,2, ,UX
DL,22, ,UY,
DL,4, ,UY,
DL,19, ,UY,
DL,16, ,UY,
DL,13, ,UY,
DL,2, ,UY,
DL,1, ,UY,
!设置流体求解属性参数
FLDATA1,SOLU,FLOW,1
FLDATA1,SOLU,TEMP,1
FLDATA1,SOLU,TURB,1
FLDATA1,SOLU,ALE,1
FLDATA1,SOLU,RDSF,1
!设置求解算法
FLDATA,ALGR,SEGR,SIMPLEN
!设置流体属性参数
FLDATA8,NOMI,DENS,1000,
FLDATA8,NOMI,VISC,0.00015,
FLDATA8,NOMI,COND,0.6,
FLDATA8,NOMI,SPHT,4182,
!考虑流体重力
ACEL,0,9.8,0,
!设置流体求解稳定参数
FLDATA26,STAB,VISC,0.25,
!设置流体压力方程求解器
FLDATA18,METH,PRES,1
FLDATA19,TDMA,PRES,700,
!设置流体对流项算法
FLDATA,ADVM,MOME,SUPG
FLDATA,ADVM,TURB,SUPG
FLDATA,ADVM,PRES,MSU
FLDATA,ADVM,TEMP,MSU
!进入多场耦合求解器
MFAN,ON,MFSC
!定义场
MFEL,1,1, , , , , , , , ,
MFFN,1,FF
MFEL,2,2, , , , , , , , ,
MFFN,2,SS
!捕获场
MFCM,           1, ,
```

```
MFCM,        2, ,
!设置场的求解顺序
MFOR,        1,        2
!设置场界面载荷传递
MFSU,        1,        1,FORC,        2
MFSU,        1,        1,TEMP,        2
MFSU,        1,        2,DISP,        1
!设置多场求解迭代次数
MFIT,11,1,11,
!开始求解
SOLVE
```



第 24 章　加温器的流-热瞬态耦合分析

24.1　问题的描述

24.1.1　几何模型

图 24-1 所示为加温器的模型简图，由图可知，该加温器由燃烧室和外壳组成，入口进入恒温的空气，经过加温后流出，热量先经过燃烧室的管壁，然后与加温器外壳中的空气发生对流热交换，模型的几何尺寸如图 24-1 所示。

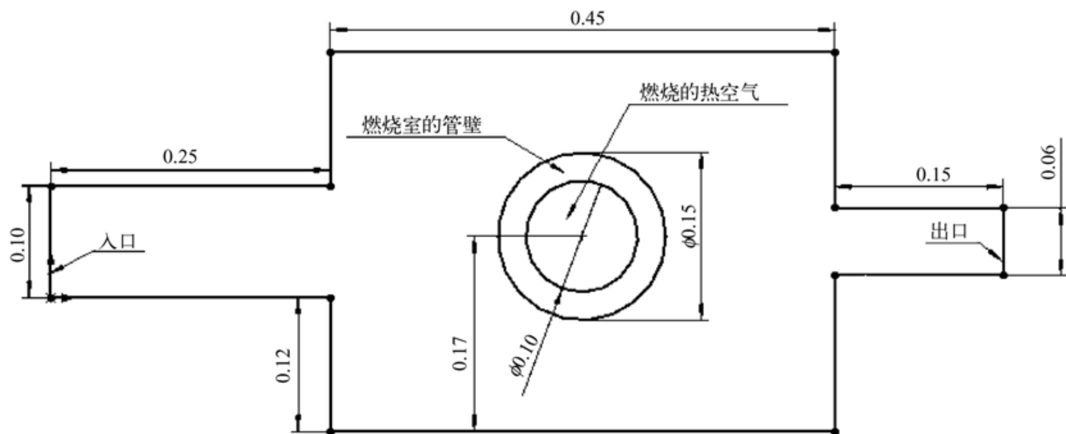


图 24-1　加温器的模型简图

24.1.2　材料参数

流体为空气，计算时选择流体属性为 AIR，燃烧室的管壁为结构钢，其密度为 7850kg/m，比热容为 434J/（kg·K），导热系数为 60.5W/（m·K）。

24.1.3　选择单元

本实例选用二维流体单元 FLUID141 单元和二维热单元 PLANE77。



24.1.4 流体流动模型

该实例假设流体的流动状态为湍流，并且使用 SST 湍流模型。

24.1.5 边界条件及载荷

入口的速度为 VX=8m/s，VY=0，入口处的温度为 293K，出口处的压力为 0，燃烧室的内壁上的温度为 1200K，壁面为无滑移条件，整个模型的初始温度为 295K。

24.2 GUI 操作

24.2.1 前处理

1. 定义文件名

GUI：Utility Menu | File | Change Jobname，弹出一个对话框，在文本框中输入“Flow-thermal coupling”，单击 OK 按钮。

2. 选择单元

GUI：Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击 Add 按钮，弹出图 24-2 所示的选择单元对话框，选择左侧中的 FLOTRAN CFD 项，然后在右边选择 2D FLOTRAN 141 项，单击 Apply 按钮，继续选择左侧中的 Thermal Solid 项，然后在右边选择 8 node 77 项，单击 OK 按钮。

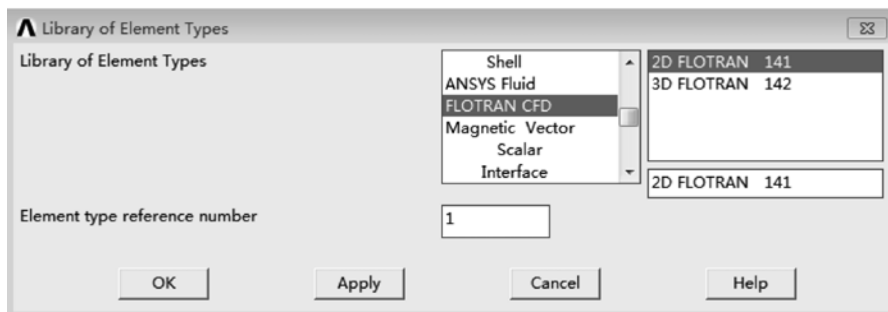


图 24-2 选择单元对话框

3. 定义材料模型

GUI：Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models，弹出一个对话框，选择菜单命令 Material | New Modle，在弹出的对话框的文本框中输入材料号为“2”，选择菜单命令 Thermal | Conductivity | Isotropic，弹出图 24-3 所示的定义材料 2 的导热系数设置面板，设置导热系数为 60.5，单击 OK 按钮，继续选择菜单命令 Thermal | Spcific Heat，弹出图 24-4 所示的定义材料 2 的比热容设置面板，设置比热容为 434，单击 OK 按钮，继续选择菜单命令 Thermal | Density，弹出图 24-5 所示的定义材料 2 的密度设置面板，设置密度为 7850，单击 OK 按钮。选择菜单命令 Material | Exit，退出定义材料模型行为的面板。

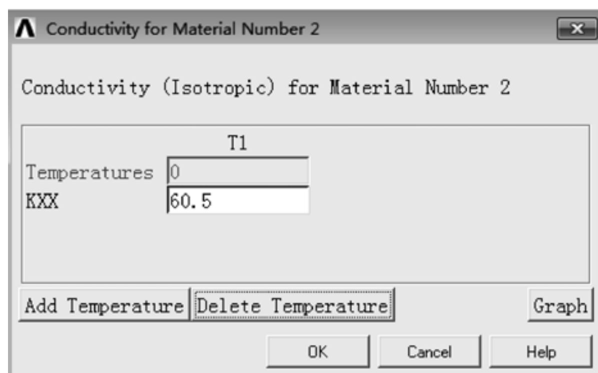


图 24-3　定义材料 2 的导热系数设置面板

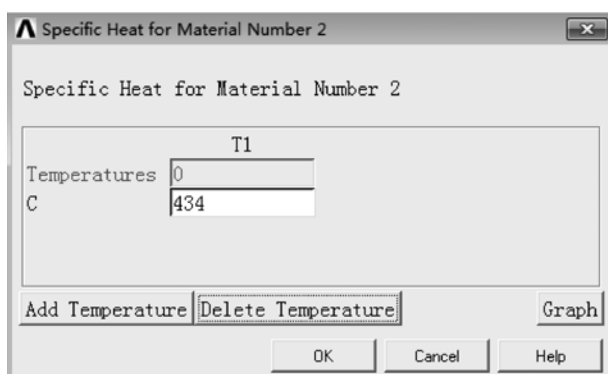


图 24-4　定义材料 2 的比热容设置面板

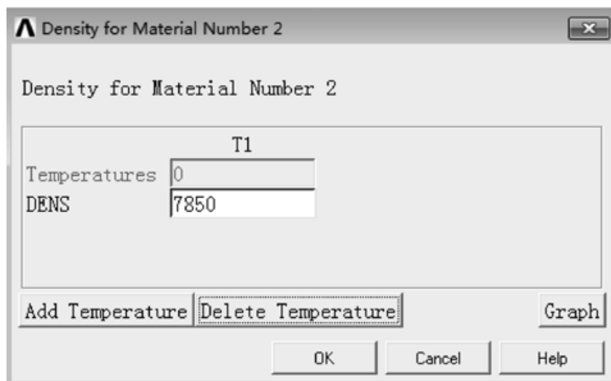


图 24-5　定义材料 2 的密度设置面板

4．建立模型

（1）定义关键点

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS，弹出图 24-6 所示的在激活坐标系中定义关键点面板，在面板中关键点号（Keypoint number）文本框中输入“1”，在激活的坐标系中设置 X=0、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设

置关键点号为 2，X=0.25、Y=0、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 3，X=0.25、Y=−0.12、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 4，X=0.7、Y=−0.12、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 5，X=0.7、Y=0.02、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 6，X=0.85、Y=0.02、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 7，X=0.85、Y=0.08、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 8，X=0.7、Y=0.08、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 9，X=0.7、Y=0.22、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 10，X=0.25、Y=0.22、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 11，X=0.25、Y=0.1、Z=0，单击 Apply 按钮；继续设置关键点号为 12，X=0、Y=0.1、Z=0，单击 OK 按钮。



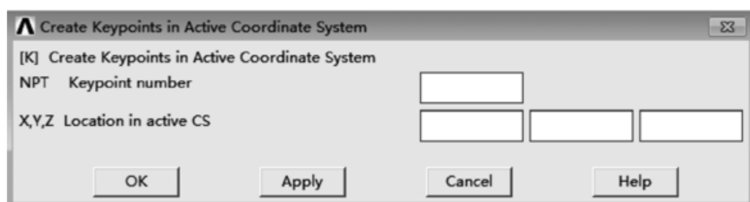


图 24-6 定义关键点面板

（2）定义面

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | Through KPs，弹出图 24-7 所示的拾取对话框，在文本框中输入关键点编号为“1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12”，单击 OK 按钮。

（3）定义圆面

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Circle | Solid Circle，弹出图 24-8 所示的定义实体圆面设置面板，设置圆面的圆心坐标为 WPX=0.475，WPY=0.05，设置圆面的半径为 0.075，单击 OK 按钮。

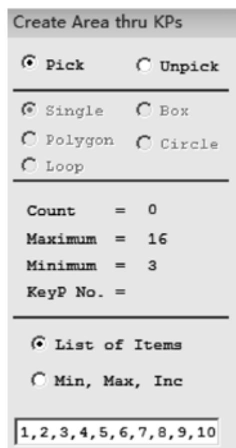


图 24-7 拾取对话框

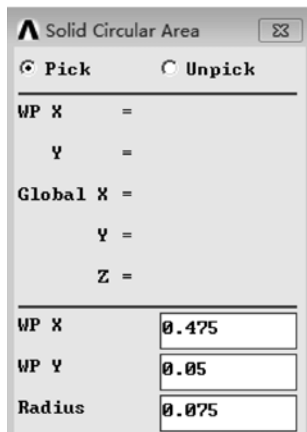


图 24-8 定义实体圆面设置面板

（4）进行布尔操作

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Subtract | Areas，弹出

拾取对话框，拾取面 A1，单击 Apply 按钮，继续拾取面 A2，单击 OK 按钮。

（5）定义圆环

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Circle | Annulus，弹出图 24-9 所示的定义圆环面设置面板，设置圆环的圆心坐标为 WPX=0.475，WPY=0.05，圆环内半径为 0.05，外半径为 0.075，单击 OK 按钮。

5．网格划分

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool

（2）设置总体网格尺寸

选择图 24-10 所示的网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设置（Set）按钮，弹出图 24-11 所示的总体网格尺寸设置面板。

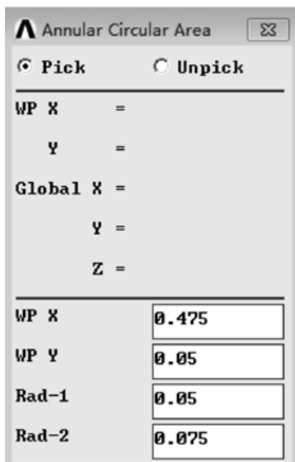


图 24-9　定义圆环面设置面板



图 24-10　网格划分工具面板中尺寸控制子面板

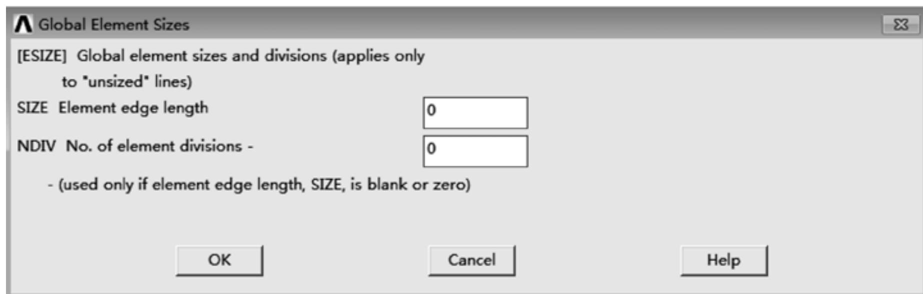


图 24-11　总体网格尺寸设置面板

该设置面板中存在两个控制选项，即单元尺寸控制（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸文本框中输入 0.005，单击 OK 按钮。

（3）划分流体区域网格

单击网格划分工具面板上的网格划分（Mesh）按钮，弹出拾取对话框，拾取面 A3，单击 OK 按钮。

（4）设置网格属性

单击网格划分工具面板上单元属性（Element Attributes）的设置（Set）按钮，弹出图 24-12 所示的网格属性设置面板，选择单元类型号（Element type number）为 2 PLANE182，材料号为 2，其他保持默认设置，单击 OK 按钮。

（5）划分固体区域网格

单击网格划分工具面板上的网格划分（Mesh）按钮，弹出拾取对话框，拾取面 A1，单击 OK 按钮。

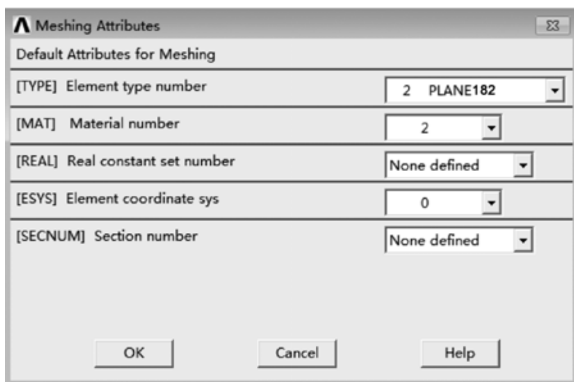


图 24-12 网格属性设置面板

24.2.2 求解基本设置

1. 定义流场边界条件

（1）定义进口边界条件

1）定义进口速度。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply 按钮 | Fluid/CFD | Velocity | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L12，单击 OK 按钮，弹出图 24-13 所示的在线处施加速度设置面板，设置 VX=8、VY=0 和 VZ=0，单击 OK 按钮。

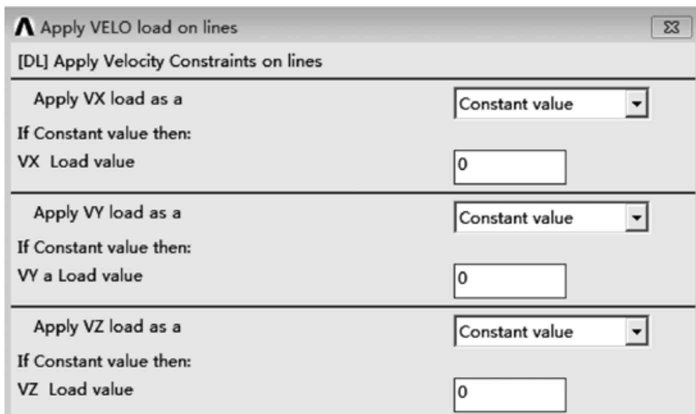


图 24-13 在线处施加速度设置面板

2）定义进口温度。

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply 按钮 | Thermal | Temperature | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L12，单击 OK 按钮，弹出图 24-14 所示的在线处施加温度设置面板，选择约束的自由度类型为 TEMP，设置约束值为 293，单击 OK 按钮。

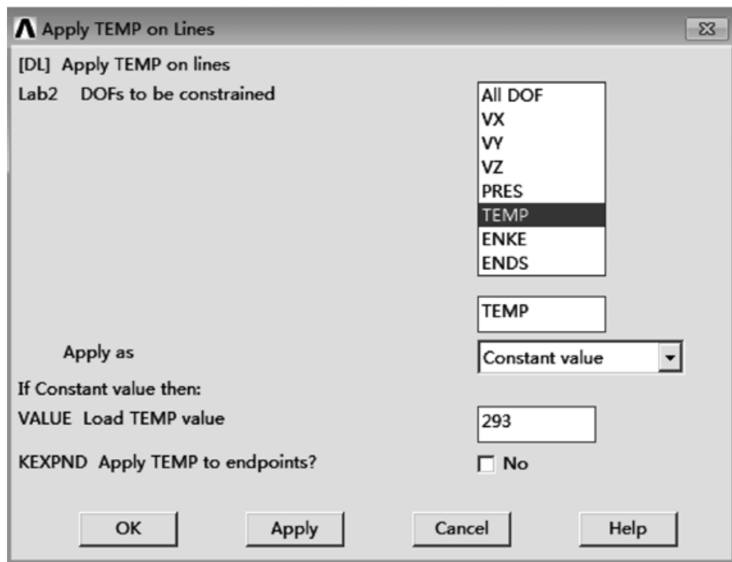


图 24-14 在线处施加温度设置面板

（2）定义出口边界条件

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply 按钮 | Fluid/CFD | Pressure DOF | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L6，单击 OK 按钮，弹出图 24-15 所示的在线处施加压力设置面板，设置压力为 0，单击 OK 按钮。

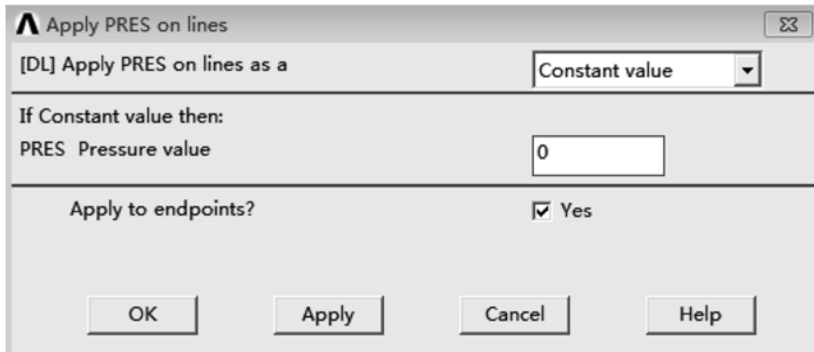


图 24-15 在线处施加压力设置面板

（3）定义壁面条件

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply 按钮 | Fluid/CFD | Velocity | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L1、L2、L3、L4、L5、L6、L7、L8、L9、L10、L11、L13、L14、L15 和 L16，单击 OK 按钮，弹出图 24-13 所示的在线处施加速度设置面板，设

置 VX=0、VY=0 和 VZ=0，单击 OK 按钮。

2．定义温度场边界条件

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply 按钮 | Thermal | Temperature | On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L22、L23、L24 和 L25，单击 OK 按钮，弹出图 24–14 所示的在线处施加温度设置面板，选择约束的自由度类型为 TEMP，设置约束值为 1200，单击 OK 按钮。

3．设置流场与温度场之间的界面

（1）定义流场界面

GUI：Main Menu | Solution Type | Define Loads | Apply 按钮 | Field Surface Intr | On Lines，弹出图 24–16 所示的定义界面的拾取对话框，在文本框中输入线的编号为“13,14,15,16”，单击 OK 按钮，弹出图 24–17 所示的在线上定义界面设置面板，设置界面号为 1，单击 OK 按钮。

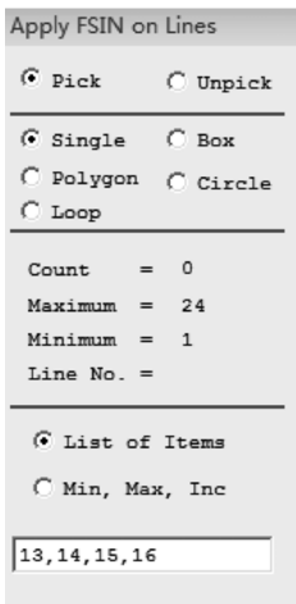


图 24–16 定义界面的拾取对话框

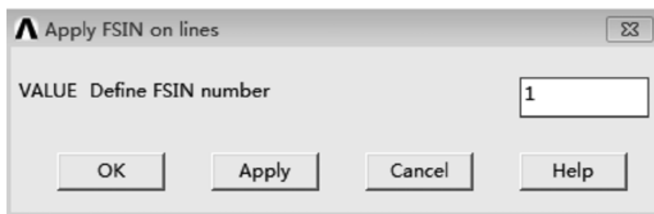


图 24–17 在线上定义界面设置面板

（2）定义温度场界面

GUI：Main Menu | Solution Type | Define Loads | Apply 按钮 | Field Surface Intr | On Lines，弹出图 24–16 所示的定义界面的拾取对话框，在文本框中输入线的编号为“17,18,19,20”，单击 OK 按钮，弹出图 24–17 所示的在线上定义界面设置面板，设置界面号为 1，单击 OK 按钮。

4．设置模型的初始温度

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply 按钮 | Initial Condit'n | Define，弹出拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出图 24–18 所示的定义初始条件设置面板，设置指定的自由度为温度并设置初始值为 293，单击 OK 按钮。

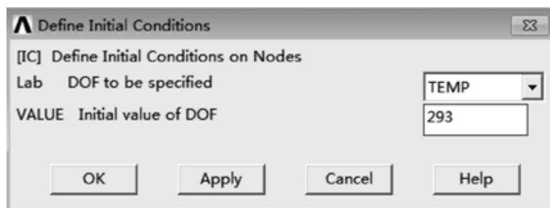


图 24−18　所示的定义初始条件设置面板

5．设置流体求解选项

GUI：Main Menu｜Solution｜FLOTRAN Set Up｜Solution Options，弹出图 24−19 所示的流体求解选项设置面板，设置 TRAN 选项为 Transient，即求解瞬态流体流动问题；设置 TURB 选项为 Turbulent，即流体流动状态为湍流，设置 TEMP 选项为 Thermal，即求解能量方程，其他选项保持默认值，单击 OK 按钮。

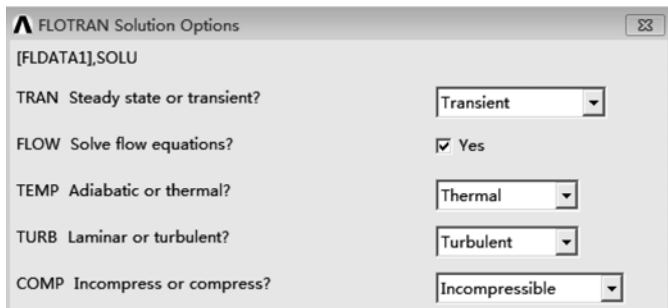


图 24−19　流体求解选项设置面板

6．设置求解算法

GUI：Main Menu｜Solution｜FLOTRAN Set Up｜Algorithm Ctrl，弹出图 24−20 所示的算法控制设置面板，选择增强型的 SIMPLEN 算法（SIMPLEN:Enhanced Algorithm），选择温度算法（Thermal Field Scheme），单击 OK 按钮。

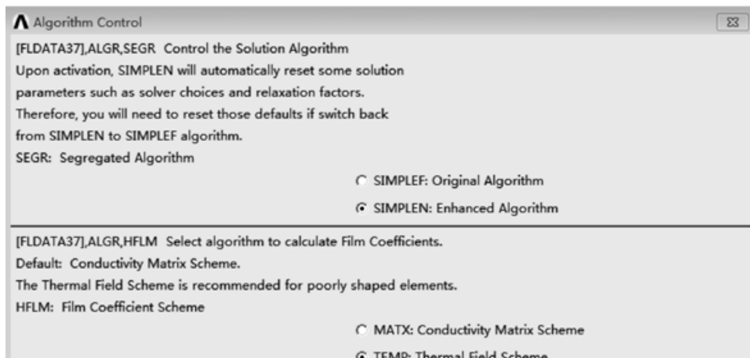


图 24−20　算法控制设置面板

7．设置求解控制

GUI：Main Menu｜Solution｜FLOTRAN Set Up｜Execution Ctrl，弹出图 24−21 所示的

时间步控制设置面板，设置时间步控制方式为用户定义（User defined），设置输出控制方式为时间步（Time Steps），单击 OK 按钮。

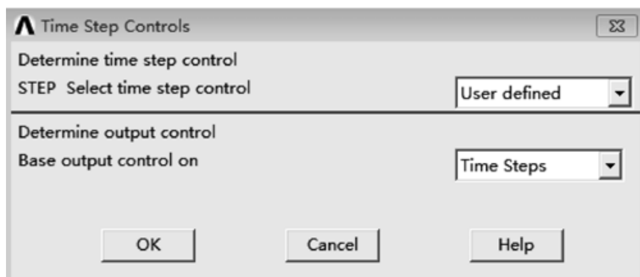


图 24-21 时间步控制设置面板

弹出图 24-22～图 24-24 所示的瞬态求解中的求解时间、迭代和结果输出设置面板，设置用户定义时间步（User-defined time step）为 0.0025，时间步数（Number of time steps）为 100，求解终止时间（Stop time）为 0.25s，设置每个时间点的总体迭代次数（Global iter per time step）为 12，设置计算结果每隔 0.0025s 输出一次（Append frequency to results file），单击 OK 按钮，

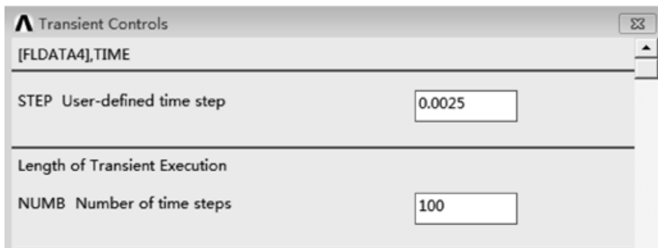


图 24-22 瞬态控制中求解时间设置面板

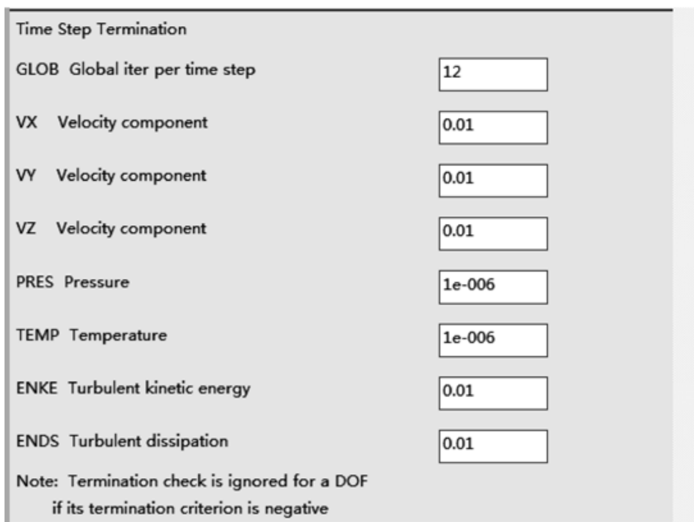


图 24-23 瞬态控制中迭代设置面板

Overwrite frequency to results file

STEP,OVER Number of time steps 0

Append frequency to results file

STEP,APPE Number of time steps 0

Summary frequency to output file

STEP,SUMF Number of time steps 10

[FLDATA4]-Transient Boundary Condition Application

TIME,BC Apply Varying B.C. as

Step Change

Linear Ramp

TEND End Time for Ramp BC 0.25

Note: End Time will also end the analysis.

图 24-24 瞬态控制中结果输出设置面板

8．设置流体属性参数

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Fluid Properties，弹出图 24-25 所示的流体属性参数设置面板，设置密度、粘度、导热系数和比热容都设置为 AIR-SI，单击 OK 按钮。

Fluid Properties

[FLDATA12],PROP,DENS

Density AIR

[FLDATA13],VARY,DENS

Allow density variations? No

[FLDATA12],PROP,VISC

Viscosity AIR

[FLDATA13],VARY,VISC

Allow viscosity variations? No

[FLDATA12],PROP,COND

Conductivity AIR

[FLDATA13],VARY,COND

Allow conductivity variations? No

[FLDATA12],PROP,SPHT

Specific heat AIR

[FLDATA13],VARY,SPHT

OK Apply Cancel Help

图 24-25 流体属性参数设置面板

9．设置流体求解稳定参数

GUI：Main Menu | Solution | FLOTRAN Set Up | Relax/Stab/Cap | Stability Parms，弹出图 24-26 所示的流体求解稳定参数设置面板，设置人工阻尼（Artificial viscosity）为 0.25，

单击 OK 按钮。

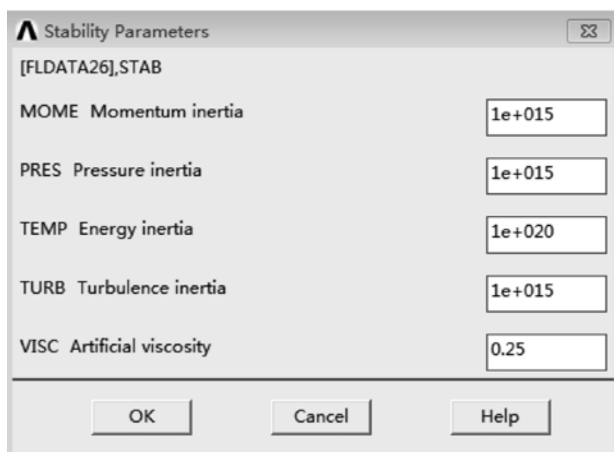


图 24-26　流体求解稳定参数设置面板

24.2.3 多场耦合求解设置

1．激活多场耦合求解器

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up，弹出图 24-27 所示的激活多场求解器设置面板，选择 ON，单击 OK 按钮，弹出图 24-28 所示的设置多场求解方法面板，选择单代码多场求解器（MFS-Single Code），单击 OK 按钮。

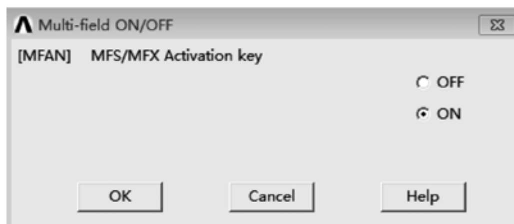


图 24-27　激活多场求解器设置面板



图 24-28　设置多场求解方法面板

2．定义场

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Define | Define，弹出图 24-29 所示的定义场设置面板，设置场号为 1，选择场单元类型为 FLUID141，设置场

名为 Fluid，单击 Apply 按钮，继续设置场号为 2，选择场单元类型为 PLANE77，设置场名为 Thermal，单击 OK 按钮。

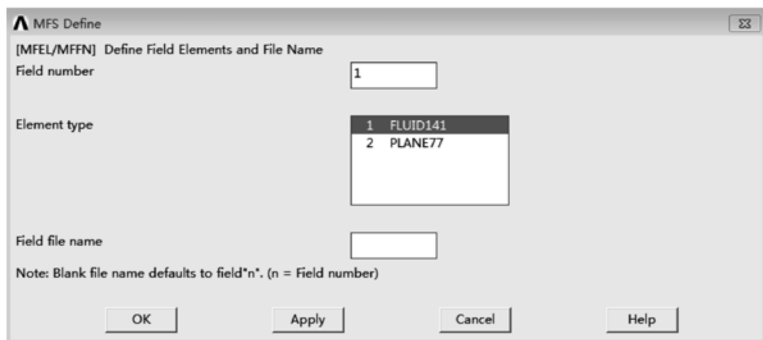


图 24-29　定义场设置面板

3．捕获场

GUI：Main Menu｜Solution｜Multi-field Set Up｜MFS-Single Code｜Capture，弹出图 24-30 所示的多场求解捕获场选项设置面板，选择场号（Filed number）为 1，单击 OK 按钮，按照原操作路径，继续选择场号（Filed number）为 2，单击 OK 按钮。

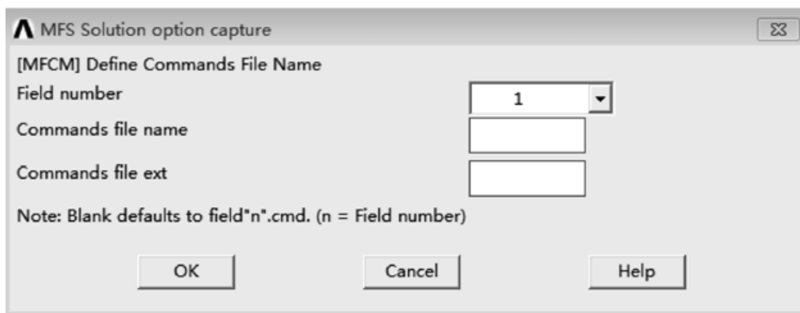


图 24-30　多场求解捕获场选项设置面板

4．设置场求解顺序

GUI：Main Menu｜Solution｜Multi-field Set Up｜MFS-Single Code｜Setup｜Order，弹出图 24-31 所示的多场求解顺序设置面板，选择先求解场 2，即先求解固体温度场，然后求解场 1，即最后求解流场，单击 OK 按钮。

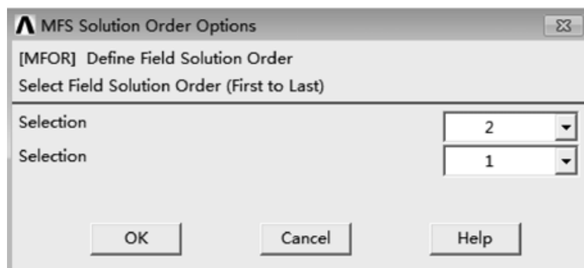


图 24-31　多场求解顺序设置面板

5．设置场界面载荷传递

GUI： Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Interface | Surface，弹出图 24-32 所示的多场求解界面载荷传递选项，设置传递数据标签为 TEMP，求解顺序为从场 2 到场 1，载荷的传递界面为 1，单击 Apply 按钮，继续设置传递数据标签为 TEMP，求解顺序从场 1 到场 2，载荷的传递界面为 1，单击 OK 按钮。

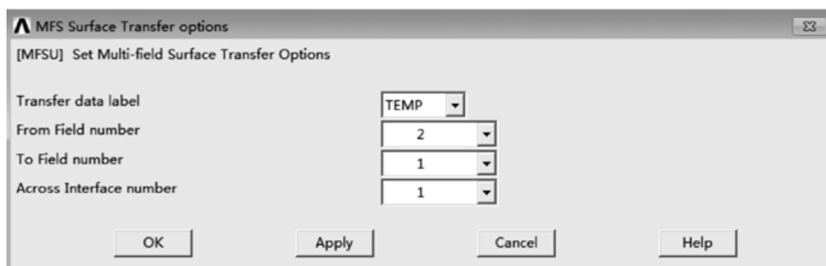


图 24-32　多场求解界面载荷传递选项

6．设置多场求解策略

（1）设置多场求解迭代次数

GUI： Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Stagger | Iterations，弹出图 24-33 所示的多场求解迭代设置面板，设置最大迭代次数（Maximum Stagger Iteration）为 4，最小迭代次数（Minimum Stagger Iteration）为 1，目标迭代次数（Target Stagger Iteration）为 4，单击 OK 按钮。

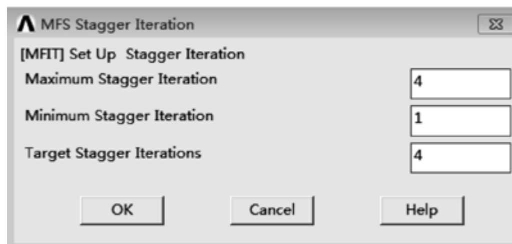


图 24-33　多场求解迭代设置面板

（2）设置多场求解收敛准则

GUI： Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Stagger | Convergence，弹出图 24-34 所示的多场耦合求解收敛选项设置面板，选择收敛项为 ALL，单击 OK 按钮，弹出图 24-35 所示的设置收敛值面板，设置收敛值为 0.01，单击 OK 按钮。



图 24-34　多场耦合求解收敛选项设置面板

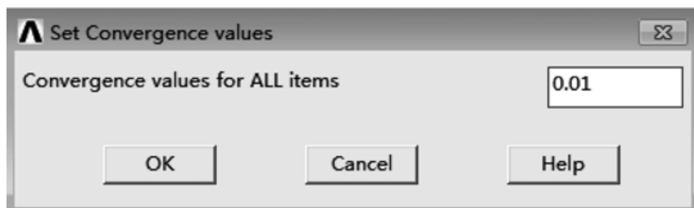


图 24-35　设置收敛值面板

（3）设置多场求解松弛系数

GUI： Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Stagger | Relaxation，弹出图 24-36 所示的多场耦合求解松弛系数设置面板，选择收敛项为 ALL，单击 OK 按钮，弹出图 24-37 所示的设置松弛系数面板，设置松弛系数为 0.5，单击 OK 按钮。

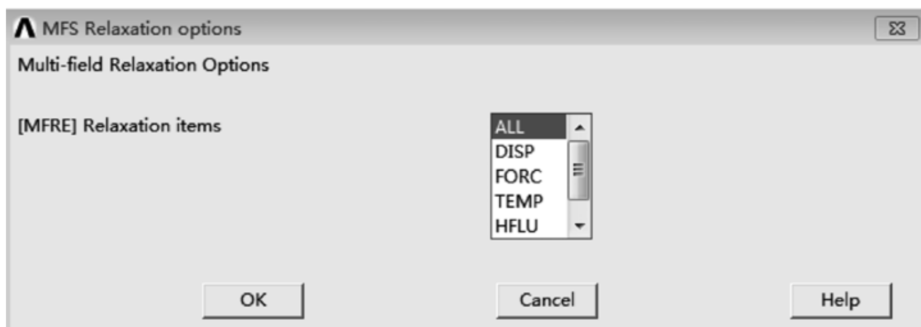


图 24-36　多场耦合求解松弛系数设置面板

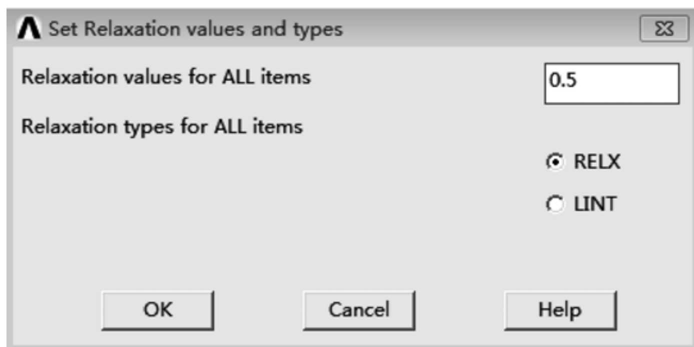


图 24-37　设置松弛系数面板

7．设置多场求解时间控制

GUI：Main Menu | Solution | Multi-field Set Up | MFS-Single Code | Time Ctrl，弹出图 24-38 所示的多场求解时间控制面板，设置多场求解结束时间为 0.15，初始时间步为 0.0015，最小时间步为 0.0015，最大时间步为 0.0015，单击 OK 按钮。

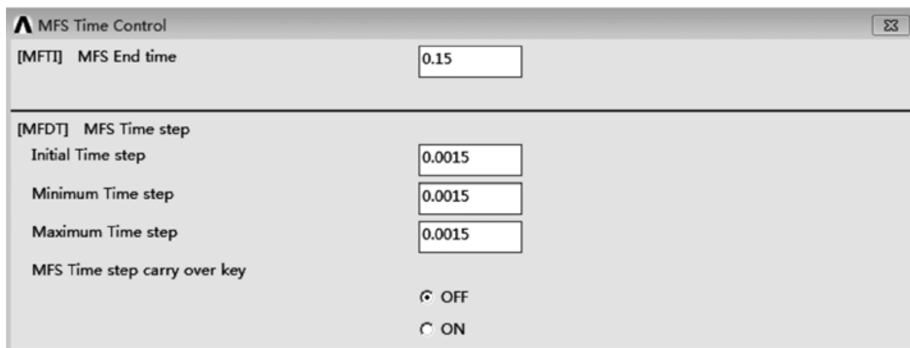


图 24-38 多场求解时间控制面板

24.2.4 多场求解

1．设置温度场载荷的加载方式

GUI：Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequency | Time-Time Step，弹出图 24-39 所示的瞬态求解时间步设置面板，设置多场求解结束时间为 0.15，时间步长为 0.0015，载荷施加方式为阶跃加载，最小时间步为 0.0015，最大时间步为 0.0015，单击 OK 按钮。

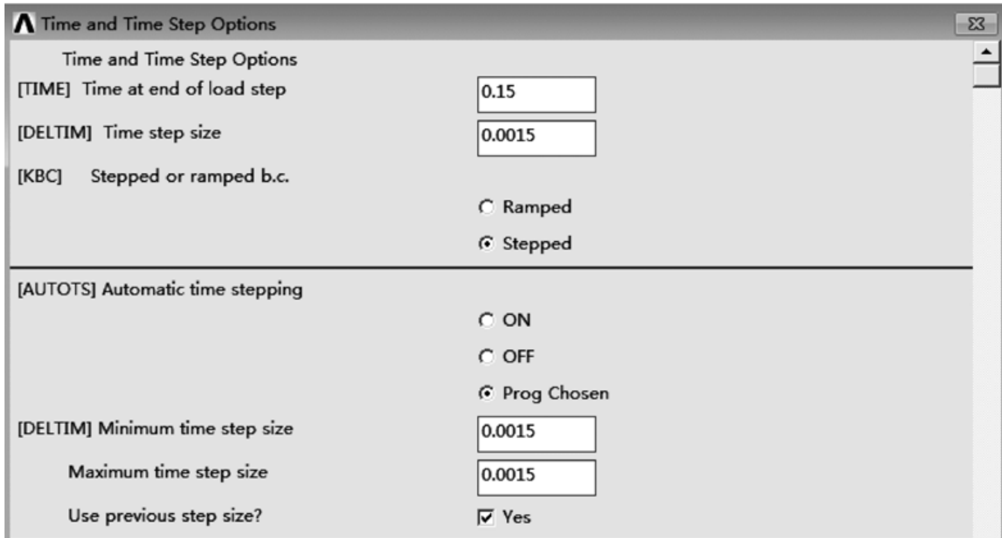


图 24-39 瞬态求解时间步设置面板

2．求解

GUI：Main Menu | Solution | Solve | Current LS，开始求解。

24.2.5 后处理

图 24-40～图 24-47 所示加温器内流场不同时刻的温度云图，图 24-48～图 24-53 所示加温器内流场的压力、速度、湍流动能、迹线温度云图和不同时刻的燃烧室壁的温度云图。图

24−54 和图 24−55 所示为加温器内 230 节点和 4085 节点处温度与时间的关系，具体查看方法，用户可以参见本章视频教程。

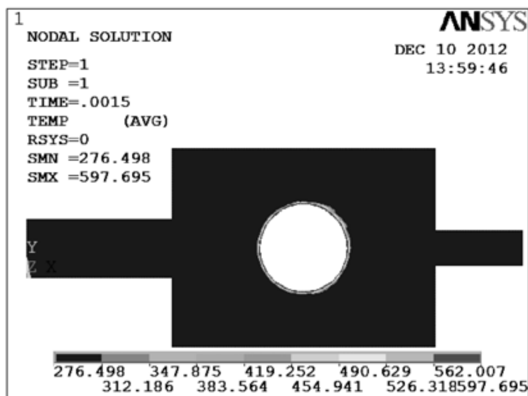


图 24−40　0.0015s 时刻的流场温度云图

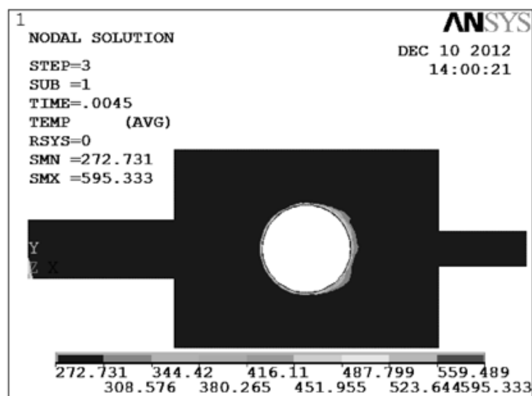


图 24−41　0.0045s 时刻的流场温度云图

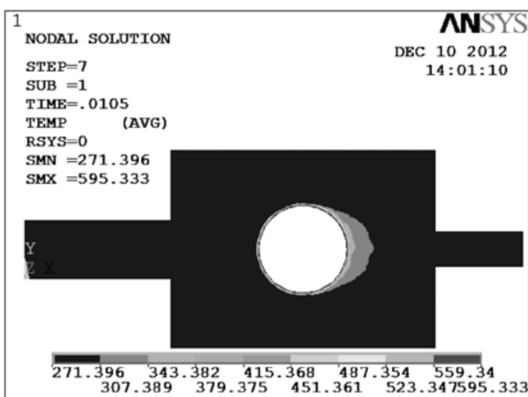


图 24−42　0.0105s 时刻的流场温度云图

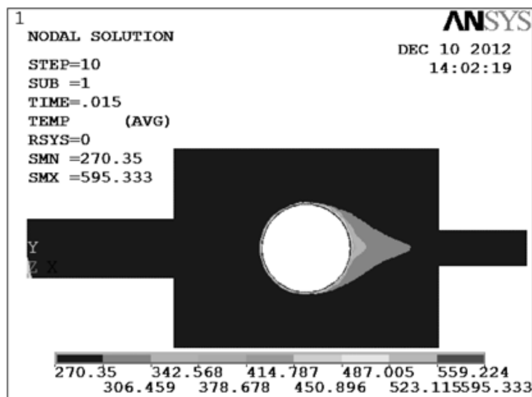


图 24−43　0.015s 时刻的流场温度云图

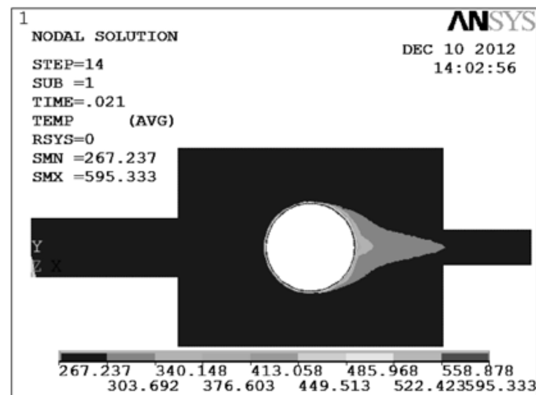


图 24−44　0.021s 时刻的流场温度云图

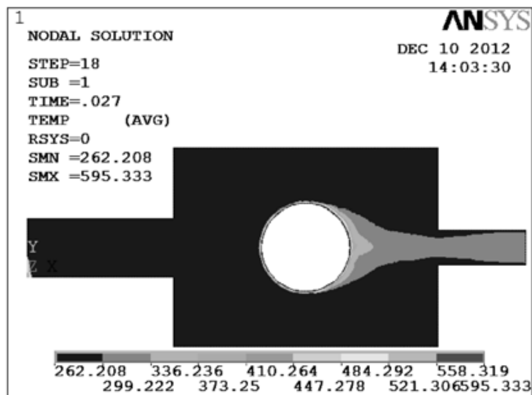


图 24−45　0.027s 时刻的流场温度云图

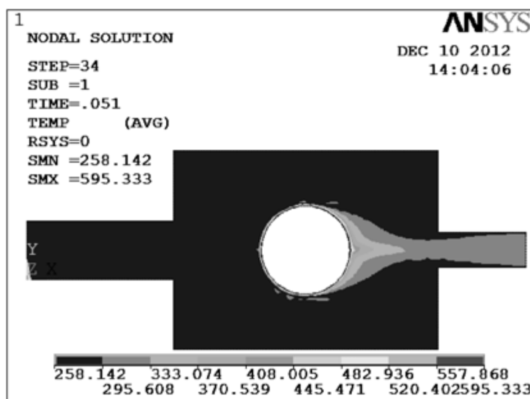


图 24-46 0.051s 时刻的流场温度云图

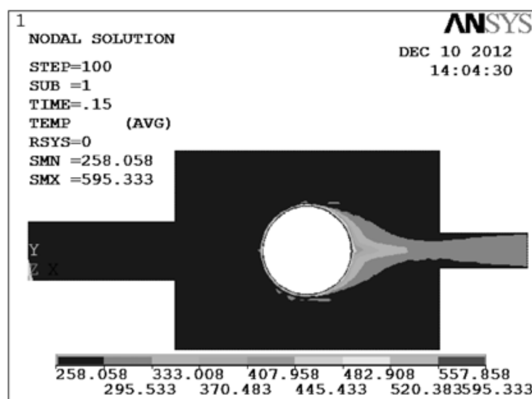


图 24-47 0.15s 时刻的流场温度云图

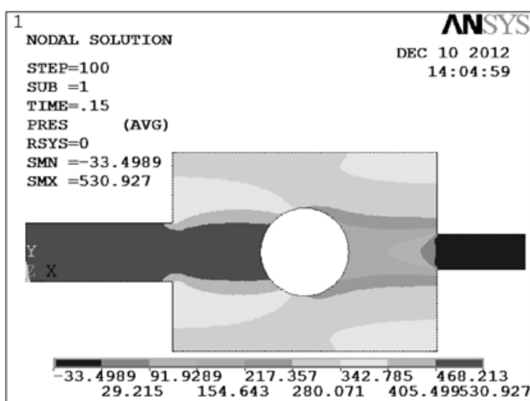


图 24-48 0.15s 时刻的流场压力云图

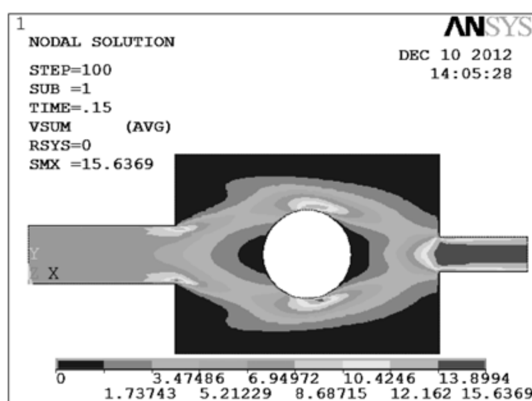


图 24-49 0.15s 时刻的流场速度云图

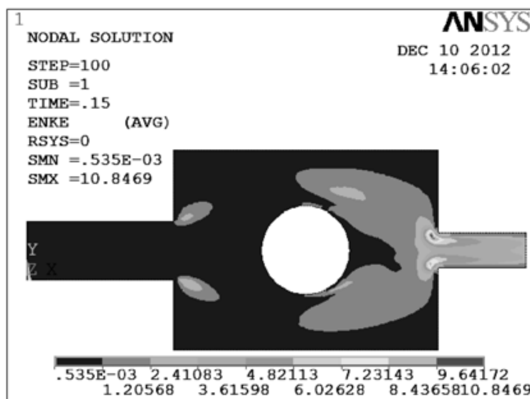


图 24-50 0.15s 时刻的流场湍流动能云图

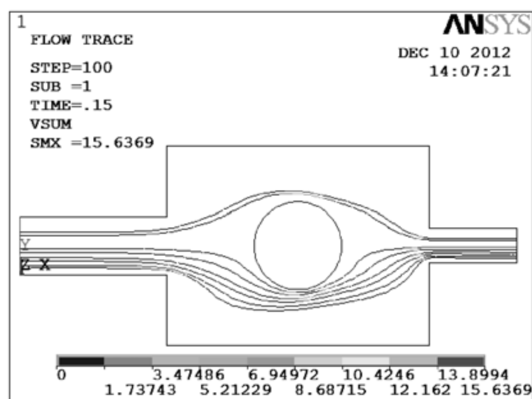


图 24-51 0.15s 时刻的流场流速迹线图

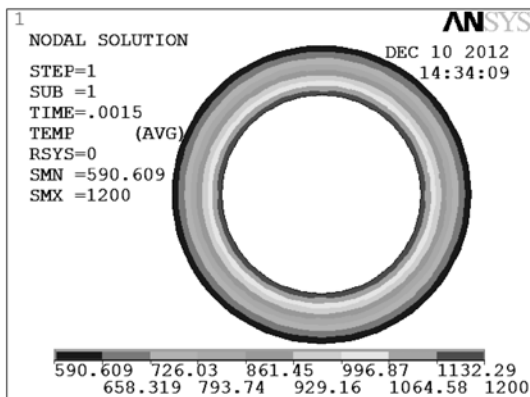


图 24-52　0.0015s 时刻的燃烧室壁的温度云图

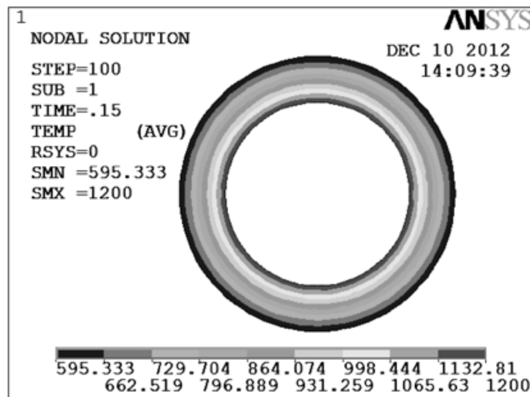


图 24-53　0.15s 时刻的燃烧室壁的温度云图

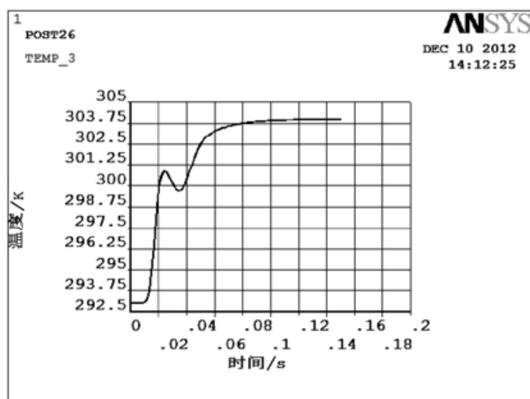


图 24-54　230 节点处温度与时间的关系

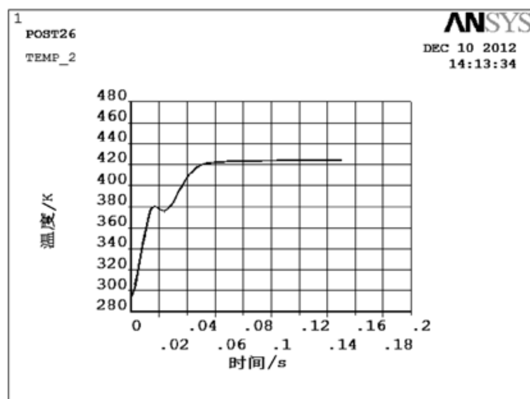


图 24-55　4085 节点处温度与时间的关系

24.3　命令流

```
/FILNAME,Flow-thermal coupling ,0
/PREP7
ET,1,141              !定义流体分析单元
ET,2,PLANE77          !定义热分析单元
!定义固体区域热分析材料参数
MP,KXX,2,60.5
MP,C,2,434
MP,DENS,2,7850
!建立模型
K,1,0,0,0
K,2,0.25,0
K,3,0.25,-0.12
K,4,0.7,-0.12
K,5,0.7,0.02
K,6,0.85,0.02
K,7,0.85,0.08
```



```
K,8,0.7,0.08
K,9,0.7,0.22
K,10,0.25,0.22
K,11,0.25,0.1
K,12,0,0.1
!通过关键点建立面
A,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,
CYL4,0.475,0.05,0.075
ASBA,       1,       2
CYL4,0.475,0.05,0.05, ,0.075
!划分流体区域网格
ESIZE,0.005
AMESH,3
!划分固体区域网格
TYPE,2
MAT,2
AMESH,1
/SOL
!定义边界条件
DL,12, ,TEMP,293,0

DL,12, ,VX,8,1
DL,12, ,VY,0,1
DL,12, ,VZ,0,1

DL,6, ,PRES,0,1

DL,13, ,VX,0,1
DL,13, ,VY,0,1
DL,13, ,VZ,0,1

DL,14, ,VX,0,1
DL,14, ,VY,0,1
DL,14, ,VZ,0,1

DL,15, ,VX,0,1
DL,15, ,VY,0,1
DL,15, ,VZ,0,1

DL,16, ,VX,0,1
DL,16, ,VY,0,1
DL,16, ,VZ,0,1

DL,1, ,VX,0,1
DL,1, ,VY,0,1
DL,1, ,VZ,0,1

DL,2, ,VX,0,1
```

```
DL,2, ,VY,0,1
DL,2, ,VZ,0,1

DL,3, ,VX,0,1
DL,3, ,VY,0,1
DL,3, ,VZ,0,1

DL,4, ,VX,0,1
DL,4, ,VY,0,1
DL,4, ,VZ,0,1

DL,5, ,VX,0,1
DL,5, ,VY,0,1
DL,5, ,VZ,0,1

DL,7, ,VX,0,1
DL,7, ,VY,0,1
DL,7, ,VZ,0,1
DL,8, ,VX,0,1
DL,8, ,VY,0,1
DL,8, ,VZ,0,1
DL,9, ,VX,0,1
DL,9, ,VY,0,1
DL,9, ,VZ,0,1
DL,10, ,VX,0,1
DL,10, ,VY,0,1
DL,10, ,VZ,0,1
DL,11, ,VX,0,1
DL,11, ,VY,0,1
DL,11, ,VZ,0,1
DL,22, ,TEMP,1200,0
DL,23, ,TEMP,1200,0
DL,24, ,TEMP,1200,0
DL,21, ,TEMP,1200,0
!设置流场与固体场之间的界面
SFL,13,FSIN,1,
SFL,14,FSIN,1,
SFL,15,FSIN,1,
SFL,16,FSIN,1,
SFL,17,FSIN,1,
SFL,18,FSIN,1,
SFL,19,FSIN,1,
SFL,20,FSIN,1,
!设置模型的初始温度
IC,ALL,TEMP,293,
!设置流体求解选项
FLDATA1,SOLU,TRAN,1
```

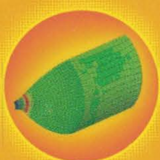
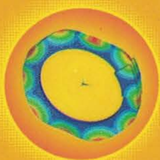
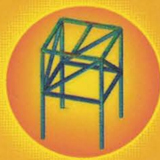
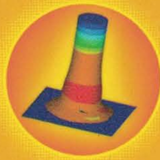


```
FLDATA1,SOLU,FLOW,1
FLDATA1,SOLU,TEMP,1
FLDATA1,SOLU,TURB,1
!设置求解算法
FLDATA,ALGR,SEGR,SIMPLEN
FLDATA,ALGR,HFLM,TEMP
!设置求解控制
FLDATA4,TIME,GLOB,12,
FLDATA4,TIME,STEP,0.0015,
FLDATA4,TIME,NUMB,100,
FLDATA4,TIME,TEND,0.15
FLDATA4A,STEP,APPE,0.0015,
FLDATA4,TIME,BC,0
!设置流体属性参数
FLDATA7,PROT,DENS,AIR
FLDATA7,PROT,VISC,AIR
FLDATA7,PROT,COND,AIR
FLDATA7,PROT,SPHT,AIR
!设置流体求解稳定参数
FLDATA26,STAB,VISC,0.25,
!进入多场耦合求解器
MFAN,ON,MFSC
!定义场
MFEL,1,1, , , , , , , ,
MFFN,1,fluid
MFEL,2,2, , , , , , , ,
MFFN,2,thermal
!捕获场
MFCM,        1, ,
MFCM,        2, ,
!设置场求解顺序
MFOR,        2,        1
!设置场界面载荷传递
MFSU,        1,        2,TEMP,        1
MFSU,        1,        1,TEMP,        2
!设置多场求解策略
MFIT,4,1,4,
MFCO,ALL,0.01,
MFRE,ALL,0.5,RELX
MFTI,0.15,
MFDT,0.0015,0.0015,0.0015,0
!设置温度场求解的载荷步
TIME,0.15
DELTIM,0.0015,0.0015,0.0015,1
KBC,1
!开始求解
SOLVE
```

在线互动交流平台

官方微博：http://weibo.com/cmpjsj
豆 瓣 网：http://site.douban.com/139085/
读者信箱：cmp_itbook@163.com

ANSYS 14.0/FLOTRAN理论解析与工程应用实例

SolidWorks系列
AutoCAD系列
Creo 系列
UG系列
CATIA系列
MATLAB系列
ANSYS系列
Mastercam系列

ANSYS系列已出版

- ANSYS 14.0/FLOTRAN理论解析与工程应用实例
- ANSYS 14.0 工程实例解析与常见问题解答
- ANSYS 14.0 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 13.0 流场分析技术及应用实例
- ANSYS 13.0与HyperMesh 11.0联合仿真有限元分析
- FLUENT 6.3 流场分析从入门到精通
- 有限元分析——ANSYS 13.0从入门到实战
- ANSYS 12.0 土木工程应用实例解析
- ANSYS 12.0 有限元分析与范例解析
- ANSYS 12.0 结构分析工程应用实例解析 第3版
- ANSYS 11.0 结构分析工程应用实例解析 第2版
- ANSYS 8.0 结构分析及实例解析

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
社服务中心：010-88361066
销售一部：010-68326294
销售二部：010-88379649
读者购书热线：010-88379203
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版

上架指导 计算机/辅助设计

ISBN 978-7-111-43383-5

策划编辑◎ 张淑谦 / 封面设计◎



子时文化 ZiShi Culture

ISBN 978-7-111-43383-5



9 787111 433835 >

定价：65.00元（含1DVD）